MEDICINA
Terapia génica para la ELA

FÍSICA DE PARTÍCULAS
El misterio de los neutrinos

CONSERVACIÓN
Réquiem por la vaquita marina

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Diciembre 2017 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

¿ESTAMOS SOLOS?

Nuevos avances en astrofísica y cosmología cuestionan la idea de que existan otras civilizaciones en el universo

LA RAZÓN EN LA CUERDA FLOJA

INFORME ESPECIAL SOBRE LA CIENCIA GLOBAL

2017



6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DICIEMBRE 2017 N.º 495 ¿ESTAMOS SOLOS? | GENÉTICA DE LA ELA | EL MISTERIO DE LOS NEUTRINOS

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA
Diciembre 2017, Número 495

76

ARTÍCULOS

NASA/JPL/INSTITUTO DE LA CIENCIA ESPACIAL


15


48


84

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Tras Copérnico, la ciencia moderna dio por supuesto que la Tierra era un planeta ordinario y que, como corolario, la vida inteligente habría de ser común en el universo. Ahora nuevas investigaciones cuestionan dicha premisa: cierto tipo de explosiones cósmicas especialmente devastadoras podrían hacer de nuestro universo un lugar extremadamente hostil a la vida compleja. Ilustración de iStock/cemagraphics, modificado por *Investigación y Ciencia*.



redaccion@investigacionyciencia.es



Julio y agosto de 2017

UNIVERSOS BURBUJA

En «El multiverso cuántico» [por Yasunori Nomura; Investigación y Ciencia, julio de 2017], el autor expone la idea tradicional de un multiverso en el que los «universos burbuja» son creados por el proceso de inflación cósmica, así como una teoría alternativa según la cual dichos universos no coexistirían en el espacio real, sino en un «espacio de probabilidades», donde corresponderían a resultados potenciales de observaciones. Nomura indica que tal vez podríamos ver signos celestes de una «colisión» entre universos. ¿Implica ello que nuestra burbuja podría colisionar en cualquier momento con otra? Y, de ser así, ¿«estallaría» nuestro universo sin previo aviso?

E. Dennis Kell
Mays Landing, Nueva Jersey

Nomura señala que las galaxias muy distantes son inobservables porque se están separando de nosotros a una velocidad mayor que la de la luz, un límite conocido como «horizonte cosmológico». Sin embargo, la teoría de la relatividad impone que nada puede moverse a velocidades superlumínicas, por lo que ello violaría la teoría de Einstein.

Bruce Barnbaum
Granite Falls, Washington

Responde Nomura: *Dada la naturaleza eterna de la inflación del espacio en que reside nuestro universo, puede darse casi por seguro que este acabará colisionando con otro tarde o temprano. Sin embargo, es muy improbable que nuestra burbuja «estalle», ya que el efecto se vería diluido por la gran cantidad de acontecimientos que han ocurrido en nuestro universo. De hecho, la atenuación del fenómeno sería tan intensa que las posibilidades de observar el más mínimo signo de semejante colisión son, por desgracia, muy bajas.*

En cuanto a la pregunta de Barnbaum, no hay aquí ninguna contradicción. Si definimos la velocidad como el cambio de posición física por unidad de tiempo, es cierto que los objetos distantes se separan de nosotros a velocidades mayores que la de la luz. Sin embargo, ello se debe a que es el espacio mismo lo que se expande, no a que los objetos se muevan a velocidades superlumínicas.

NÚMERO MÁGICO

En la columna de Juegos Matemáticos «Lo veo, lo demuestro... pero ¿lo entiendo?» [por Jean-Paul Delahaye; Investigación y Ciencia, agosto de 2017], el «Milagro 3: ¿Un número excepcional?» afirma que, si partimos de un número de tres cifras no todas iguales, las reordenamos en orden decreciente y luego creciente, las restamos y repetimos la operación, llegaremos siempre al número 495, un hecho que parece carecer de explicación razonada. He creído encontrar una demostración.

Consideremos un número $N = abc$, con $a \geq b \geq c$ pero no todos iguales. El resultado de la diferencia $abc - bca$ es

$$X_1 = [a - c - 1]\ 9\ [10 + c - a]\ .$$

La suma de las cifras es 18, lo que ocurrirá siempre que llevemos a cabo este proceso. Vamos a obtener, además, un número con la segunda cifra igual a 9. Eso reduce los posibles resultados a los siguientes números:

099, 990, 198, 891, 297,
792, 396, 693, 495, 594.

Ahora nuestro número será de la forma $X_1 = x9y$. Suponiendo (sin pérdida de generalidad) que $x \leq y$ y repitiendo el proceso, obtenemos

$$X_2 = 9yx - xy9 = [8 - x]\ 9\ [1 + x]\ .$$

Como es lógico, los dígitos vuelven a sumar 18, pero ya solo influye en el resultado la cifra más pequeña.

Si, para simplificar, formamos pares de números con la primera y la última cifra (es decir, obviando el 9 del centro) y vemos la evolución de la secuencia, obtenemos, por ejemplo:

(0,9), (8,1), (7,2), (6,3),
(5,4), (4,5), (4,5), (4,5) ...

Nótese que habría dado lo mismo empezar por (9,0), ya que lo único que importa es el valor de la cifra menor, y no la posición que ocupa cada una. La secuencia siempre converge hacia el mismo resultado con independencia de cómo empecemos. Por ejemplo:

(2,7), (6,3), (5,4), (4,5), (4,5), (4,5) ...

De esta manera es fácil ver por qué el proceso acaba siempre en (4,5), es decir, en 495, ya que es en ese momento cuando los lugares de las cifras se invierten (y, a partir de entonces, solo pueden permanecer iguales).

Nota: Además, es fácilmente demostrable que la resta es igual a $99(9-x)$; es decir, un múltiplo de 99, ya que

$$100(8-x) + 90 + 1 + x = 99(9-x)\ .$$

Raquel Clabo Clemente
Collado Villalba, Madrid

Responde Delahaye: *La demostración es correcta, muy clara y astuta. Hay que felicitar a la lectora. Es interesante disponer de una demostración tan corta para el caso del número 495. Con todo, me gustaría hacer dos observaciones.*

Estos pasos demuestran el resultado, pero lo mismo ocurre con un cálculo sistemático que considere todos los casos posibles. El resultado aparece ahora algo más claro, pero sigue siendo bastante misterioso: lo veo, lo demuestro, pero ¿lo entiendo? La segunda observación es que el mismo método no se aplica al caso del número 6174, ni tampoco indica qué podría suceder al generalizar el problema a números de n cifras.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



LAS FULGURACIONES SOLARES, como la que creó esta erupción magnética filamentosa en 2012, pueden señalar la existencia de una tormenta capaz de dañar las redes eléctricas y los satélites de comunicaciones en todo el planeta.

NASA/CME/SDO

ESPACIO

¿Una tormenta solar apocalíptica?

Un estudio analiza el daño económico que podría causar una erupción solar con capacidad para alterar el campo magnético terrestre

La humanidad ya ha comenzado a afrontar peligros de escala planetaria, como el calentamiento global. Hasta ahora, sin embargo, muy pocos han prestado atención a las consecuencias que podría acarrear una tormenta solar catastrófica; es decir, una erupción de masa y energía del Sol con intensidad suficiente para alterar el campo magnético terrestre. En un artículo aparecido hace poco en el repositorio de prepublicaciones arXiv, dos astrofísicos de Harvard han intentado estimar el daño económico de un evento semejante. Los autores concluyen que el riesgo aumentará con el tiempo y estiman que, de aquí a 150 años, las pérdidas podrían igualar el actual producto interior bruto de EE.UU. (unos 20 billones de dólares).

Ya existen precedentes de este tipo de tormentas. En 1859, el conocido como «episodio de Carrington» comenzó con una brillante fulguración solar y una eyección de partículas de alta energía, las cuales provocaron la mayor tormenta magnética terrestre de la que se tenga constancia. El suceso causó vivas auroras boreales e incluso hubo telegrafistas que sufrieron descargas eléctricas. No obstante, una tormenta como la de Carrington resultaría hoy mucho más dañina, ya que nuestra sociedad depende fuertemente de la red eléctrica, los satélites de comunicaciones y el GPS. [*Véase* «Super-

tormenta solar», por Sten F. Odenwald y James L. Green; Investigación y Ciencia, octubre de 2008.]

Para cuantificar la amenaza, Abraham Loeb y Manasvi Lingam, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, han elaborado un modelo matemático que parte del supuesto de que la vulnerabilidad social a las erupciones solares crecerá al mismo paso que los avances técnicos. Según dicho modelo, durante los próximos 50 años el perjuicio económico potencial dependerá sobre todo de la probabilidad, creciente en el tiempo, de que se produzca una tormenta solar catastrófica. Después, aumentará exponencialmente con el progreso tecnológico hasta que este se estabilice.

Algunos expertos han puesto en duda tales predicciones. «Calcular el impacto económico es complicado hoy, no digamos ya para dentro de un siglo», señala Edward Oughton, del Centro de Estudios sobre el Riesgo de la Universidad de Cambridge. En todo caso, el investigador considera que la incertidumbre no debería disuadirnos de tomar ciertas medidas preventivas, como fabricar redes eléctricas más resistentes o mejorar los sistemas de alarma temprana.

Loeb y Lingam conciben una estrategia mucho más atrevida: un escudo magnético entre la Tierra y el Sol, cuyo coste estiman en unos 100.000 millones de dólares. Daniel Baker, director del Laboratorio para la Física de la Atmósfera y el Espacio de la Universidad de Colorado en Boulder, considera sin embargo que la idea parece «bastante absurda», ya que las partículas solares llegan a la Tierra desde todas las direcciones.

Stacey Worman, analista de la consultora Abt Associates, conviene en que un mejor conocimiento de la «meteorología espacial» nos ayudaría a prepararnos para una tormenta solar peligrosa. «Es una cuestión difícil pero importante a la que tendríamos que prestar más atención.»

—Jeremy Hsu

NEUROCIENCIA

El placer después de comer

El cerebro segrega sustancias reconfortantes al acabar la comida, aunque esta no haya sido apetitosa

Cuando padecemos una experiencia dolorosa, nuestro cerebro segrega analgésicos naturales cuya composición química es similar a la de potentes fármacos, como la morfina. Ahora, las investigaciones apuntan a que esos opioides endógenos cumplen otro cometido: regular el equilibrio energético del cuerpo.

Lauri Nummenmaa, especialista en neuroimagen de la Universidad de Turku, y sus colaboradores midieron la secreción de opioides endógenos en el cerebro de diez varones sanos. Se les inyectó una sustancia radiactiva que se une a los receptores de los opioides, lo cual permite visualizar la tomografía de emisión de positrones mediante la actividad de dichos receptores.

El estudio descubrió indicios de analgésicos naturales en el cerebro de los participantes después de que comieran una apetitosa porción de pizza. De modo sorprendente, su cerebro liberó incluso más opioides endógenos después de ingerir un alimento líquido mucho menos tentador pero con un contenido nutricional similar, que Nummenmaa calificó como «mejunje nutritivo». Si bien los voluntarios valoraron la pizza como más sabrosa, la liberación de los opioides no pareció depender del goce de la comida, como describieron a inicios de este año en *Journal of Neuroscience*.



GETTY IMAGES

«Esperaríamos justo el resultado contrario», confiesa Paul Burghardt, investigador de la Universidad Estatal de Wayne, que no participó en el trabajo. Al fin y al cabo, estudios precedentes en animales y en humanos llevaron a pensar que los opioides endógenos ayudan a transmitir el placer de comer.

Nummenmaa también confiesa haber quedado perplejo. Investigaciones previas de su grupo habían descubierto que el cerebro de las personas obesas albergaba menos receptores de opioides, pero los niveles de estos se recuperaban si adelgazaban. «Quizá cuando la gente come en exceso los opioides endógenos liberados por el cerebro bombardean sin cesar los receptores y, como consecuencia, su número se reduce», opina.

El motivo por el que la cantidad de opioides que inundó el cerebro fue mayor después de ingerir el mejunje que la pizza sigue siendo una incógnita, pero los autores especulan con que la digestión más rápida del alimento líquido podría haber generado mayor cantidad de ellos en el momento de la exploración, a los 15 minutos de comer.

Los nuevos resultados podrían indicar que los opioides desempeñan funciones más amplias en el metabolismo energético de lo que se pensaba hasta el momento. Cabe la posibilidad de que el sistema opioide se desencadene por la satisfacción del estómago lleno y de haber repuesto energías, aclara Nummenmaa.

«Si uno da un paso atrás y se fija en las condiciones que activan la liberación de los opioides (dolor, comer, placer), todas ellas están vinculadas con la homeostasis», o el mantenimiento del equilibrio energético del cuerpo, reflexiona. «Lo más interesante es que el acto de comer activó el sistema sin que hubiera placer sensorial en ello.»

—Stephani Sutherland

LINGÜÍSTICA

Hablar con chasquidos

La forma de la cavidad bucal explicaría por qué tan pocas lenguas hacen uso de esos sonidos

Los chasquidos del habla, como los propios de ciertas lenguas africanas, corresponden a consonantes perfectamente inteligibles. Así pues, ¿por qué son tan poco frecuentes en la mayoría de las lenguas humanas? La razón podría residir en la anatomía.

Estudios anteriores han planteado que en algunos hablantes de las lenguas que los emplean, la apófisis alveolar (la protuberancia en forma de herradura donde se engastan los dientes superiores y el paladar) es pequeña o incluso nula. En una investigación novedosa, Scott Moisik, de la Universidad de Tecnología de Nanyang, en Singapur, y Dan Dediu, del Instituto Max Planck de Psicolingüística, en Nimega, elaboraron modelos biomecánicos que simulan los chasquidos en canales vocales con apófisis alveolares de diversos tamaños. Sus resultados, publicados el pasado enero en *Journal of Language Evolution,* revelan un claro inconveniente para los canales con apófisis grandes. Estas permitirían atrapar menos aire en la cavidad bucal, lo que exigiría más fuerza muscular para proferir el sonido.

Los autores opinan que este hallazgo avala la existencia de un sesgo anatómico contrario a los chasquidos. Creen que el sesgo probablemente sea poco relevante a nivel individual: las personas cuya apófisis alveolar es abultada pueden aprender esas lenguas en las que se profieren chasquidos, pero los modelos indican que les resultaría difícil aprender las consonantes dotadas de ellos o las pronunciarían incorrectamente. Amplificado con el paso de las generaciones, este sesgo podría explicar por qué tales consonantes son tan escasas en las lenguas del mundo.

Estos resultados no son los primeros que ponen en duda la premisa arraigada entre los lingüistas de que la evolución del lenguaje es inmune, en buena medida, a los factores externos. Otros investigadores han argumentado en fecha reciente que el marco geográfico, también las condiciones ambientales y la genética podrían influir. Pero el trabajo de Moisik y Dediu va un paso más allá, porque señala a un único rasgo de la anatomía humana y cuantifica su contribución a un tipo concreto de fonema.

Susanne Fuchs, investigadora del Centro Leibniz de Lingüística General, en Berlín, ajena al trabajo, afirma que las conclusiones del estudio son válidas, pero advierte de que podrían representar el dilema del huevo o la gallina: «La forma del paladar sufre un proceso de maduración desde el inicio de la infancia hasta la pubertad y... la emisión frecuente de chasquidos podría modificarlo», opina Fuchs. «Por tanto, es perfectamente posible que, a lo largo de la historia, las propiedades del canal vocal y las de la emisión de los chasquidos se hayan desarrollado en paralelo.»

—Anne Pycha

BIOMECÁNICA

El contoneo del lagarto

Los gecos leopardo adaptan su locomoción a la pérdida de la cola

En algún rincón de las tierras altas de Afganistán, un zorro hambriento fija su mirada en un apetitoso geco leopardo. Pero a este le queda una última baza: su cola desprendible. El apéndice caído se agita y se retuerce distrayendo al raposo; un tiempo precioso que el geco aprovecha para huir y buscar refugio.

El geco leopardo es una de las pocas especies de lagarto dotada de la facultad de autoamputación, o autotomía. La estratagema surte efecto, pero la cola supone casi una cuarta parte de su peso. ¿Cómo se adaptan a tamaña pérdida con tal rapidez?

Cuando el geco pierde la cola adopta una postura más «despatarrada» y camina con las extremidades más separadas del cuerpo, explica Kevin Jagnandan, biólogo de la Universidad Chapman. La mayoría de los especialistas supusieron en un principio que esta pose obedecía al cambio súbito del centro de gravedad. Pero cuando Jagnandan sometió a observación a gecos leopardo indemnes en su laboratorio, reparó en que contonean la cola cuando caminan, lo cual indica que esos movimientos podrían ser claves para su locomoción.

Para poner a prueba esa hipótesis, Jagnandan y su equipo examinaron las posturas de diez gecos en distintas condiciones de deambulación: con la cola intacta, con un pequeño trozo de caña de pescar adherido a la cola (de peso ínfimo) que entorpecía su movimiento y, por último, con la cola completamente autoamputada. Esas comparaciones permitieron distinguir los efectos derivados de la pérdida de peso de los causados por dejar de agitar la cola durante la locomoción.

Los gecos con la cola inmovilizada adoptaron posturas parecidas a los desprovistos de ella, según dieron a conocer el pasado septiembre en *Scientific Reports.* Este resultado apunta a que el caminar patiabierto que adoptan tras la pérdida no pretende compensar el peso perdido, sino más bien la carencia del vaivén de la cola. Jagnandan cree que el movimiento de esta ayuda a mantener el equilibrio y la estabilidad cuando el geco camina. Sospecha que la cola de los mamíferos arborícolas, como la de numerosos felinos y primates, cumple idéntico propósito.

Al biólogo Bill Ryerson, del Colegio Universitario San Anselmo, en New Hampshire, y ajeno al estudio, le han sorprendido los resultados: «Dábamos por hecho que era un asunto resuelto, que estaba claro como el agua que el peso era el factor principal». El nuevo estudio pone en entredicho de modo elegante esa idea, opina Ryerson.

Jagnandan espera que el conocimiento de cómo reaccionan estos reptiles a la pérdida de miembros anatómicos ayude en última instancia a diseñar robots capaces de desplazar con mayor eficiencia cargas pesadas, o incluso extremidades enteras.

—Jason G. Goldman



THOMAS FUCHS (*chasquidos*); EVAN KAFKA, GETTY IMAGES (*geco*)

EXOPLANETAS

Mundos vecinos

La mayoría de los planetas extrasolares cercanos que conocemos orbitan en torno a estrellas mucho menores y más tenues que el Sol

Los astrónomos ya han descubierto más de 3500 exoplanetas, a los que habrá que sumar miles más durante los próximos años. Algunos de ellos tendrán un tamaño, composición y temperatura muy similares a los de la Tierra. Sin embargo, se diferenciarán en un aspecto importante: no orbitarán en torno a estrellas semejantes al Sol, sino alrededor de enanas rojas, o enanas de tipo M. Aunque estos astros constituyen las estrellas activas más pequeñas y frías del universo, son también el mejor lugar para encontrar exoplanetas, en parte debido a su abundancia [*véase* «CARMENES, el detector de exotierras», por José A. Caballero; Investigación y Ciencia, mayo de 2016]. No pueden observarse a simple vista, pero dan cuenta de más de la mitad de las 140 estrellas conocidas a menos de 20 años luz del Sol y albergan 2/3 de los exoplanetas descubiertos hasta ahora en dicha zona (*gráfico*). A pesar de su baja temperatura, los planetas que orbiten lo suficientemente cerca de ellas estarán calientes. Parecidos a la Tierra o no, estos mundos extraterrestres están destinados a convertirse en los más familiares para nosotros.

—*Lee Billings*

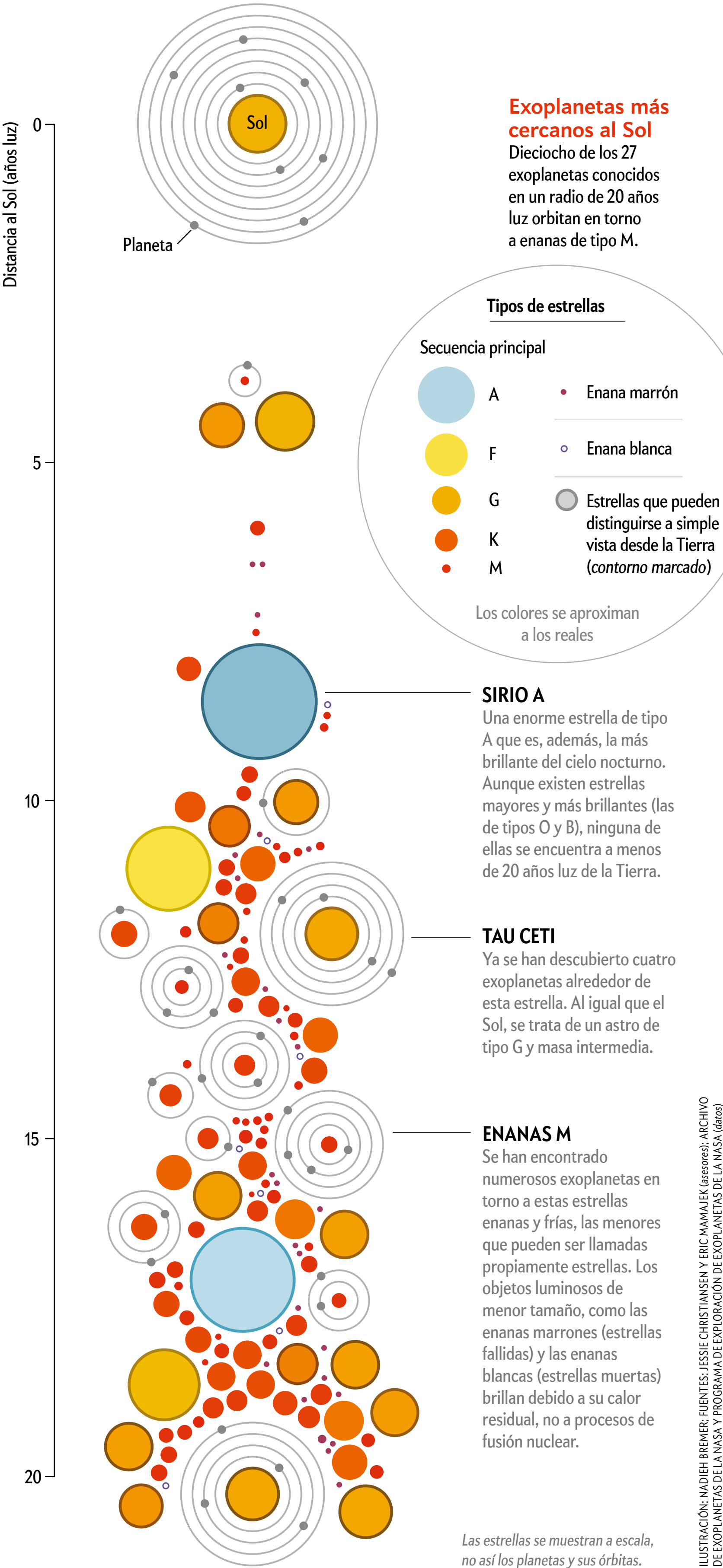


ILUSTRACIÓN: NADIEH BREMER; FUENTES: JESSIE CHRISTIANSEN Y ERIC MAMAJEK (*asesores*); ARCHIVO DE EXOPLANETAS DE LA NASA Y PROGRAMA DE EXPLORACIÓN DE EXOPLANETAS DE LA NASA (*datos*)

Mundos lejanos

El Satélite de Inspección de Exoplanetas en Tránsito (TESS), de la NASA, cuyo lanzamiento está previsto para marzo de 2018, examinará todo el cielo y se centrará en 2,5 millones de estrellas, una quinta parte de las cuales serán enanas de tipo M. Dado que sus instrumentos detectarán con mayor facilidad planetas pequeños y rocosos que orbiten próximos a estrellas enanas, lo más probable es que los mundos potencialmente habitables que encuentre se hallen en enanas de tipo M.

Estrellas prioritarias para TESS: 2,5 millones

Enanas M prioritarias para TESS: 0,5 millones

PSICOLOGÍA

Sano parece, sano es

La ubicación de los expositores con alimentos saludables puede decantar las decisiones de compra en el supermercado

Visite el supermercado con el estómago vacío y volverá a casa con algunas cosas que no había previsto comprar. Pero las punzadas de hambre no son las únicas culpables de la compra impulsiva. También la ubicación de los expositores influye en nuestras decisiones de compra y puede crear o acabar con algunos de nuestros hábitos saludables de alimentación.

La línea de cajas es un punto donde se concentra especialmente la comida basura. Los estudios han comprobado que los productos más habituales en ella son tentempiés azucarados y salados, y un puñado de estudios plantean que solo con cambiarlos por opciones más sanas sería posible modificar la conducta del comprador. Una investigación realizada en 2012 en Holanda comprobó que los trabajadores de hospital eran más propensos a dejar de lado la comida basura y a escoger los tentempiés saludables si estos eran más accesibles en los expositores de la cafetería. De modo parecido, en 2014, investigadores noruegos e islandeses hallaron que sustituir los comestibles no saludables por otros que sí lo eran en la zona de cajas mejoraba notablemente las ventas de último minuto de los alimentos sanos.



THOMAS FUCHS *(ilustración)*; BIBLIOTECA NACIONAL DE ESPAÑA *(mapa)*

Estos hallazgos llamaron la atención del Departamento de Salud e Higiene Mental de la Ciudad de Nueva York, que ha estado trabajando con más de mil propietarios de supermercados y tiendas de comestibles para fomentar la venta de alimentos nutritivos. «Sabemos que el sector minorista de los comestibles rebosa de señuelos para inducir al consumo», asegura Tamar Adjoian, investigador del departamento. «Situar mejor los alimentos sanos o hacerlos más apetitosos puede aumentar las ventas de estos productos.»

Adjoian y sus colaboradores se preguntaron si esos resultados serían aplicables a las concurridas líneas de caja de las grandes ciudades, por lo que buscaron la colaboración de tres supermercados del distrito neoyorquino del Bronx para su estudio. Dedicaron un tramo de la línea de cajas de cada establecimiento a los productos saludables, sustituyendo las golosinas, las galletas y otros tentempiés procesados por frutas, frutos secos y comestibles similares, que contenían como máximo 200 calorías por ración. Después, registraron las compras de cada supermercado a lo largo de seis períodos de tres horas durante dos semanas.

De los más de 2100 compradores analizados, solo el 4 por ciento compró algo en la línea de cajas. Entre los que lo hicieron, empero, los clientes de las cajas situadas en la zona saludable compraron artículos nutritivos con una frecuencia más de dos veces mayor que los que pasaron a través de las cajas ordinarias, y compraron un 40 por ciento menos comestibles poco saludables. Estos resultados aparecieron en septiembre en *Journal of Nutrition Education and Behavior*.

El posible impacto de tales medidas puede parecer pequeño, pero Adjoian cree que modificar más líneas de caja abriría los ojos de los clientes a los alimentos nutritivos y bajos en calorías. Los funcionarios del Departamento de Salud están estudiando modos de ampliar la oferta de opciones saludables a los pasillos de caja de toda la ciudad de Nueva York.

—*Rachel Nuwer*

AGENDA

CONFERENCIAS

2 de diciembre
La ciencia nuestra de cada día
Carlos Sampedro Villasán, catedrático de física y química de educación secundaria
Parque de las Ciencias, Granada
www.parqueciencias.com

12 de diciembre
Ciencia y tecnologías cuánticas de la información
J. Ignacio Cirac, Instituto Max Planck de Óptica Cuántica
Instituto de Química Física Rocasolano
Madrid
coloquiocurie.csic.es

14 de diciembre
El arte de hacer demostraciones en matemáticas, la belleza y la genialidad en esta disciplina
Joan Josep Carmona, Universidad Autónoma de Barcelona
Centro Cívico Guinardó, Barcelona
aula141.cat

20 de diciembre
Organismos genéticamente modificados: Una visión panorámica
Federico Zurita, Universidad de Granada
Universidad de Granada
fciencias.ugr.es

EXPOSICIONES

Cartografías de lo desconocido: Mapas en la BNE
Biblioteca Nacional de España, Madrid
www.bne.es



Marte: La conquista de un sueño
Espacio Fundación Telefónica
Madrid
espacio.fundaciontelefonica.com

OTROS

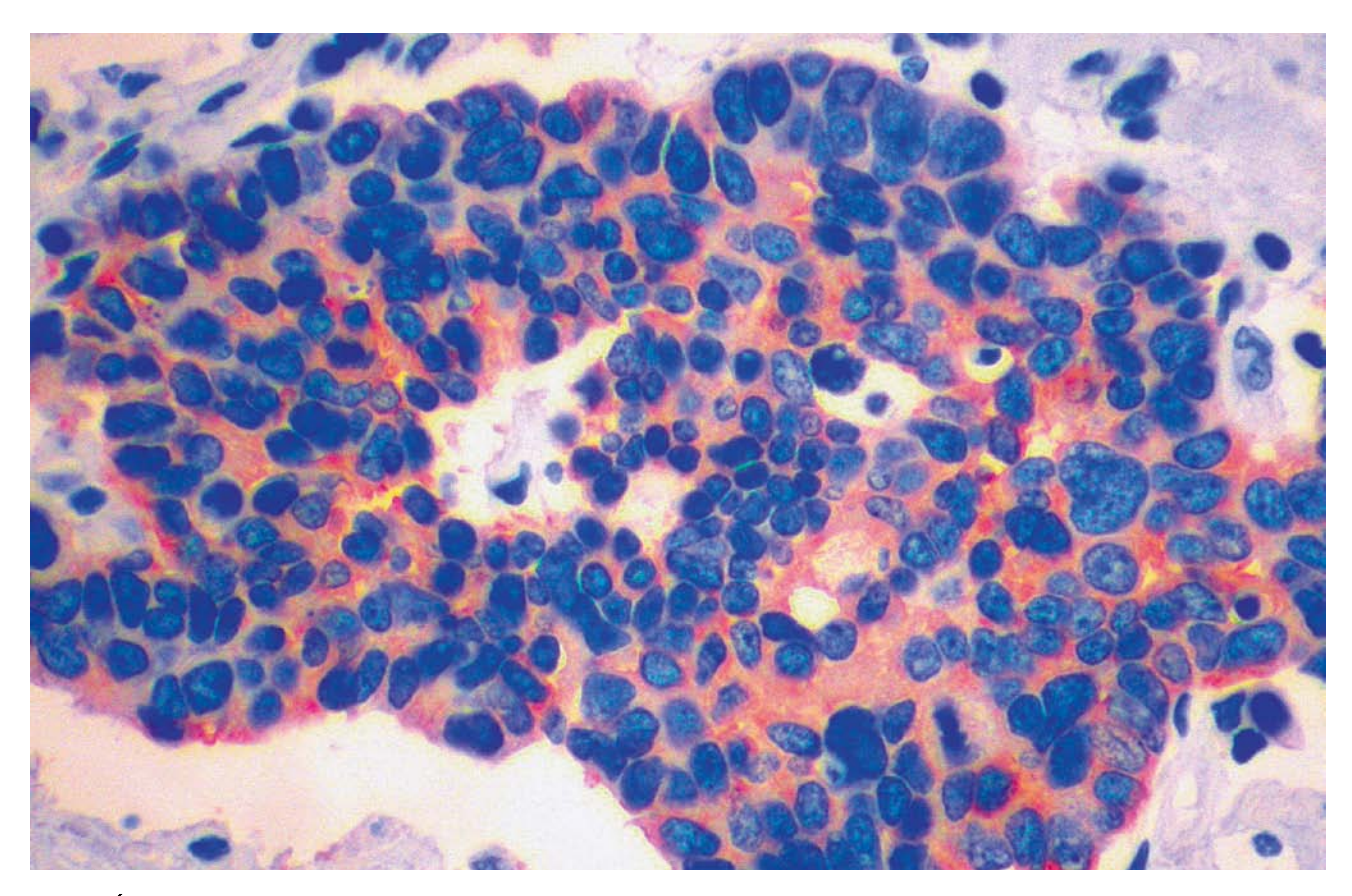
Cuéntaselo a tus padres
Concurso de vídeos divulgativos sobre biología molecular y bioquímica para estudiantes de bachillerato y universidad
Sociedad Española de Bioquímica y Biología Molecular
www.cuentaseloatuspadres.com

CÁNCER

Una estrategia personalizada contra el cáncer

El empleo de organoides tumorales podría ayudarnos a tomar decisiones terapéuticas más precisas y a entender mejor la respuesta de los tumores a los tratamientos

RODRIGO DIENSTMANN Y JOSEP TABERNERO



CÁNCER PULMONAR de células pequeñas. La investigación con organoides tumorales cultivados a partir de células cancerosas de pacientes representa una estrategia prometedora en la búsqueda de un tratamiento personalizado contra el cáncer.

La terapia de precisión contra el cáncer combina los conocimientos más recientes sobre la biología de los tumores con técnicas de vanguardia para identificar las alteraciones génicas que puedan relacionarse con los fármacos adecuados para tratarlos. En su artículo publicado en *Cancer Discovery*, Chantal Pauli, del Colegio Médico Weill Cornell, en Nueva York, y sus colaboradores escriben un nuevo capítulo sobre este tema mediante el empleo de la secuenciación del ADN de muestras de tumores y el análisis de modelos celulares procedentes de pacientes. Ello permite llevar a cabo el cribado ultrarrápido de fármacos para determinar los patrones de tratamiento-respuesta y, de ese modo, ampliar las opciones para adaptar la terapia a cada persona.

Trabajos previos

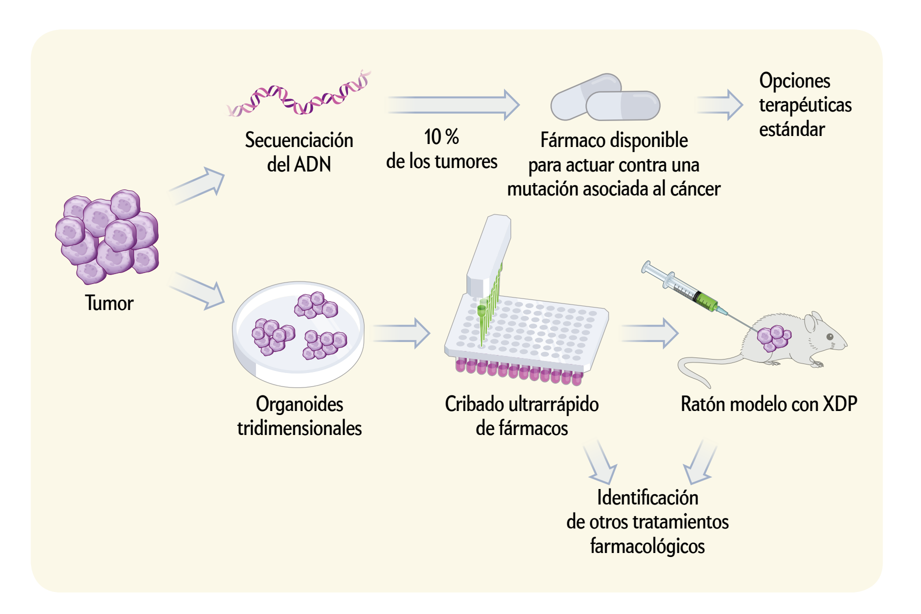
En investigaciones anteriores, Pauli y sus colaboradores habían obtenido muestras de tumores de pacientes y de sus tejidos sanos (para poder compararlos) y secuenciaron regiones del genoma codificadoras de proteínas. Pretendían identificar las alteraciones génicas específicas de cada tumor sobre las que pudiesen actuar los fármacos. Sin embargo, pronto se dieron cuenta de que, en la mayoría de los casos, la información de la secuencia del ADN, por sí sola, no era suficiente para guiar la toma de decisiones terapéuticas. De los 501 pacientes analizados (la mayoría de los cuales ya se hallaba en una fase avanzada de la enfermedad), tan solo un 10 por ciento presentaba alteraciones genéticas que podían relacionarse directamente con fármacos específicos aprobados por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de los Estados Unidos (FDA).

Ese porcentaje incluía a pacientes cuyos tumores podían haber respondido ante fármacos de uso extraoficial, aquellos

autorizados para actuar sobre una alteración en un tipo de tumor pero utilizados para tratar otros tipos de cáncer.

A diferencia del trabajo de Pauli, un estudio de Christophe Massard, del Instituto Gustav Roussy, al sur de París, y sus colaboradores, estableció vínculos entre tumores y tratamientos en alrededor del 40 por ciento de los casos. Emplearon criterios menos rigurosos, aunque ampliamente aceptados, para valorar la idoneidad del tratamiento; en concreto, incluyeron las alteraciones del ADN que podían ser tratadas con sustancias cuyo uso actual solo está autorizado en ensayos clínicos. Pero, aún así, en la mayoría de los pacientes de ambos estudios, los resultados de la secuenciación del ADN no aportaron la suficiente información como para poder diseñar terapias personalizadas debido al reducido número de tratamientos farmacológicos idóneos disponibles.

Tal situación llevó a Pauli y sus colaboradores a buscar otra forma de identificar vínculos potencialmente eficaces entre tumores y medicamentos. Emplearon organoides, unas estructuras celulares cultivadas en sistemas tridimensionales in vitro que mantienen las interacciones tanto entre las células como entre estas y la matriz celular que las rodea. Estos cultivos, procedentes de las células tumorales de los pacientes, conservan mejor las características biológicas de los tejidos que los habituales cultivos celulares en monocapa. Los organoides ofrecen una plataforma a gran escala para evaluar la sensibilidad de los tumores a los fármacos en un tiempo razonablemente rápido, lo que permite diseñar aplicaciones clínicas basadas en los resultados.



TRATAMIENTO PERSONALIZADO DE LOS TUMORES: Cuando se ha secuenciado el ADN de tumores de pacientes para identificar alteraciones específicas del cáncer, se ha observado que solo un 10 por ciento de ellos presenta una alteración vinculada a un tratamiento farmacológico estándar (*arriba*). Para identificar las opciones terapéuticas en el caso de tumores no asociados a ningún fármaco, se han creado cultivos tridimensionales de células tumorales in vitro, denominados organoides. Estos se han empleado para llevar a cabo un cribado ultrarrápido de fármacos, con el fin de identificar las moléculas que frenan el crecimiento de las células cancerosas. Tales moléculas se han validado en ratones modelo a los que se les trasplantaron células del organoide, lo que se conoce como xenoinjerto derivado del paciente (XDP) (*abajo*).

La nueva estrategia

Mediante organoides, los investigadores analizaron un extenso catálogo formado por casi 160 compuestos, lo que les permitió identificar fármacos y combinaciones de fármacos eficaces contra la proliferación de las células cancerosas. Sus hallazgos se validaron in vivo trasplantando células de los organoides a ratones inmunodeficientes para generar modelos personalizados que se conocen como «xenoinjertos derivados de pacientes», una prueba de referencia para la evaluación preclínica de los tratamientos oncológicos. El estudio de Pauli representa uno de los primeros ejemplos de estrategias basadas en organoides que llevan a cabo un cribado ultrarrápido de fármacos y una validación de estos últimos en xenoinjertos derivados de los mismos organoides.

A partir de 145 especímenes que abarcaban 18 tipos de tumores, los autores generaron 56 cultivos celulares de organoides y 19 modelos de xenoinjertos obtenidos a partir de biopsias, bien de tumores primarios, o bien de tejidos de células cancerosas que habían migrado a otros lugares, lo que se conoce como metástasis. En el artículo de *Cancer Discovery* se detallan los resultados de la secuenciación del ADN de los tumores de cuatro pacientes, las pruebas del cribado ultrarrápido de fármacos mediante organoides y la validación de los datos con xenoinjertos. Los investigadores identificaron los fármacos eficaces in vitro y, en base a los resultados de cribados secundarios de fármacos, se seleccionaron combinaciones óptimas para su validación in vivo. Sin embargo, es importante destacar el hecho de que los tratamientos individuales propuestos no se ensayaron en los pacientes, por lo que no se pudo demostrar si los fármacos seleccionados en el proceso eran clínicamente activos. Los autores también reconocen que las dificultades en el empleo extraoficial de sustancias aprobadas o autorizadas solo para uso experimental suponen un obstáculo para la verificación clínica de los datos.

La viabilidad del uso de muestras de tumores de los pacientes para analizar a gran escala su sensibilidad a los fármacos, junto con el análisis genómico de los tumores para considerar el uso extraoficial de ciertos medicamentos, ya había sido demostrada por Tea Pemovska, de la Universidad de Helsinki, y sus colaboradores en un estudio previo centrado en leucemias que no respondían a la quimioterapia. En esa situación, a los enfermos en fase terminal se les concedió el acceso a fármacos aprobados exclusivamente para su uso en ensayos clínicos. Después de que los pacientes recibieran mezclas de sustancias cuya eficacia en ese cáncer se había pronosticado en un cribado de fármacos, se vio que su respuesta a corto plazo resultaba esperanzadora. Sin embargo, el equipo de Pemovska también halló pruebas de que, a medida que la leucemia avanzaba, los tumores de los pacientes se hacían resistentes a esas sustancias y vulnerables a otras; la secuenciación del ADN puso de manifiesto un

grupo de alteraciones génicas asociadas a la progresión de la enfermedad.

Las plataformas de cribado de fármacos basadas en tumores para predecir de manera precisa las respuestas clínicas se fundamentan en el hecho de que las células cultivadas retienen las complejas características moleculares y biológicas de los tumores de donde proceden. Aunque el ADN del cáncer y sus perfiles de transcripción se mantienen bastante bien en los modelos celulares preclínicos, cuando se los compara con los tumores originales de los pacientes se descubren diferencias en los microentornos inmunitario y vascular. Los fármacos que inhiben los puntos de control del sistema inmunitario y las interacciones entre las células tumorales y las que rodean a estas, denominadas células del estroma, no podrían ser identificados a partir de organoides derivados únicamente de células cancerosas.

Además, los organoides suelen presentar un elevado nivel de expresión de los genes implicados en las respuestas a sustancias foráneas y de los implicados en procesos metabólicos que podrían afectar al crecimiento y la supervivencia de las células cancerosas. Y no solo eso, una respuesta ante un fármaco observada en un organoide podría no garantizar una respuesta en los pacientes, dadas las diferencias que existen entre los procesos que activan las moléculas del fármaco en los modelos preclínicos y en los seres humanos. Asimismo, la vida media de los compuestos y su pico de concentración en el lugar donde se halla el tumor pueden variar enormemente cuando se comparan entre sí los experimentos in vitro e in vivo.

El potencial de la técnica

Pero a pesar de esas variaciones, que pueden resultar cruciales a la hora de seleccionar el sistema óptimo de cribado de fármacos, los patrones fármaco-respuesta observados en el estudio de Pauli y en otros se asemejaban bastante entre los organoides y los sistemas de xenoinjertos. Los futuros avances técnicos podrían mejorar nuestra capacidad para predecir los resultados clínicos. Estos avances podrían incluir experimentos con organoides que incorporasen varios tipos celulares, como células del estroma, para imitar un microentorno in vivo; y podrían considerar también modelos de xenoinjertos más «humanizados», con ratones inmunodeficientes que contuvieran células inmunitarias humanas, lo que facilitaría las investigaciones centradas en mejorar las inmunoterapias.

Creemos que el potencial real de los bancos de organoides derivados de pacientes se pondrá de manifiesto cuando los investigadores generen grandes bases de datos compartidas. Estas deberían permitir no solo estudiar las complejas relaciones entre la genómica de los tumores y la sensibilidad de estos a los fármacos, sino también identificar mezclas de fármacos que actúen específicamente sobre ellos y funcionen mejor que las quimioterapias que se utilizan con más frecuencia en determinados tumores. Normalmente, las respuestas clínicas a las monoterapias dirigidas contra alteraciones génicas específicas tienen una vida corta. Por otro lado, en la mayoría de los casos, la combinación de fármacos más eficaz no puede deducirse a partir de los resultados de la secuenciación del ADN y de las investigaciones publicadas sobre el cáncer.

Dos tipos de análisis correlativos podrían resultar especialmente informativos, una vez establecidos los perfiles de numerosos casos y cuando estas grandes bases de datos se hagan disponibles para la elaboración de modelos. El primero consistiría en una comparación cruzada de los parámetros fármaco-respuesta para sustancias con distintos mecanismos de acción. Las agrupaciones de fármacos que muestren unos patrones de sensibilidad con un elevado grado de correlación entre las muestras podrían servir de base para deducir terapias combinadas, a pesar de la inherente variabilidad genómica y transcripcional observada en cualquier tumor. El segundo consistiría en correlacionar las sensibilidades a fármacos con la genómica de los tumores. Posteriormente, se podrían seleccionar combinaciones de fármacos que exhibieran un efecto sinérgico, incluso cuando solo se dispusiera de datos genómicos.

El método de medicina de precisión descrito por Pauli y sus colaboradores podría ayudar a acortar la distancia entre los conocimientos actuales sobre la genómica del cáncer y el desarrollo de terapias personalizadas. Aunque la estrategia solo se ha ensayado en un reducido número de centros de investigación, el uso de una plataforma de cribado ultrarrápido de fármacos basada en organoides ha dado lugar al descubrimiento inesperado de medicamentos que actúan sobre alteraciones específicas asociadas a los tumores. El método ha permitido identificar parejas entre tumores y sensibilidad a los fármacos que ya se están analizando en ensayos clínicos.

Para facilitar la aplicación clínica de la estrategia se necesita mejorar el porcentaje de los organoides viables derivados de tumores e investigar otras fuentes de células tumorales (como las procedentes de muestras de sangre) para no tener que depender de biopsias repetidas de metástasis en individuos que presentan tumores sólidos. La técnica de cribado de fármacos basada en organoides, combinada con análisis genómicos a lo largo del tiempo para comprender la evolución de los clones sensibles y los resistentes al fármaco, podría allanar el camino que nos lleve a tratamientos dinámicos, flexibles y personalizados del cáncer en fases avanzadas.

Rodrigo Dienstmann *es investigador del Instituto de Oncología del Hospital Universitario del Valle de Hebrón (VHIO), en Barcelona, y de Sage Bionetworks, en Seattle.*

Josep Tabernero *es director del VHIO, jefe del Departamento de Oncología Médica del VHIO y profesor de medicina de la Universidad Autónoma de Barcelona.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 548, págs. 40-41, 2017. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Individualized systems medicine strategy to tailor treatments for patients with chemorefractory acute myeloid leukemia. T. Pemovska et al. en *Cancer Discovery*, vol. 3, págs. 1416-1429, 2013.

Personalized in vitro and in vivo cancer models to guide precision medicine. C. Pauli et al. en *Cancer Discovery*, vol. 7, págs. 462-477, 2017.

High-throughput genomics and clinical outcome in hard-to-treat advanced cancers: Results of the MOSCATO 01 Trial. C. Massard et al. en *Cancer Discovery*, vol. 7, págs. 586-595, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cerebros creados en el laboratorio. Jürgen A. Knoblich en *IyC*, marzo de 2017.

TECNOLOGÍA

Comunicaciones seguras gracias al caos

La activación controlada de una dinámica caótica en un cristal optomecánico abre la puerta a una nueva técnica para encriptar mensajes

DANIEL NAVARRO-URRIOS Y CLIVIA M. SOTOMAYOR TORRES



La fuerza que la luz ejerce sobre los cuerpos ha sido objeto de la curiosidad humana desde hace siglos. La primera mención a tales fuerzas se debe a Johannes Kepler, quien en el siglo XVI recurrió a ellas para explicar por qué la cola de un cometa apuntaba siempre en dirección opuesta al Sol. Los primeros experimentos dedicados a cuantificarlas se llevaron a cabo a principios del siglo XX, y ya en los años ochenta se concibieron las primeras geometrías optomecánicas; es decir, diseños destinados a aprovechar el efecto de la luz sobre dispositivos mecánicos.

En este contexto, la optomecánica en cavidades estudia la interacción entre la luz almacenada en una cavidad óptica y la deformación mecánica inducida en ella. En los últimos años, este principio físico ha dado lugar a aplicaciones de todo tipo, desde los interferómetros de ondas gravitacionales (como el célebre experimento LIGO, un dispositivo de dimensiones kilométricas) hasta diminutas interfaces cuánticas, cuyo objetivo consiste en convertir bits cuánticos, o qubits, en señales ópticas que puedan propagarse por cables de fibra.

Una de las líneas de trabajo que persigue nuestro grupo de investigación en el Instituto Catalán de Nanociencia y Nanotecnología (ICN2) se basa en obtener dinámicas optomecánicas complejas que puedan aprovecharse en sistemas ópticos de comunicación segura. En un trabajo publicado este año en *Nature Communications*, hemos demostrado la posibilidad de generar de manera controlada efectos de carácter caótico en un dispositivo optomecánico de silicio. Los resultados suponen un primer paso hacia una nueva tecnología de bajo coste que, gracias a la introducción de componentes caóticos en la señal, permitiría alcanzar altos niveles de seguridad en las comunicaciones ópticas.

Láseres ópticos y láseres mecánicos

En nuestro grupo trabajamos con cristales optomecánicos unidimensionales: puentes de silicio nanoestructurados cuya longitud puede llegar a la decena de micrómetros. Tales sistemas se fabrican con las mismas técnicas que se aplican a diario en la industria de dispositivos microelectrónicos. Ello supone una clara ventaja, ya que, sea cual sea la aplicación encontrada, la posibilidad de construirlos en masa y a bajo coste es directa.

Los cristales optomecánicos se comportan simultáneamente como cristales fotónicos para las longitudes de onda del

infrarrojo cercano, y fonónicos para las excitaciones mecánicas de hasta decenas de gigahercios. Esto significa que resulta posible controlar la manera en que se propagan por el material tanto los fotones (los cuantos de luz) como los fonones (los cuantos de vibración).

En el caso que nos ocupa creamos una cavidad en el centro del cristal, lo que permite confinar fotones y fonones en volúmenes inferiores a un micrómetro cúbico. Si una resonancia óptica de la cavidad se excita con un láser, es posible almacenar decenas de miles de fotones usando solamente un milivatio de potencia. Gracias a ello, las densidades de energía óptica en la cavidad pueden alcanzar con facilidad varias decenas de kilojulios por metro cúbico. A tales energías, los fenómenos ópticos no lineales (aquellos en los que la magnitud del efecto deja de ser proporcional a la magnitud de la causa) comienzan a desempeñar un papel importante.

En fecha reciente hemos investigado un fenómeno conocido como «autopulsado», el cual se activa bajo condiciones específicas de potencia y de longitud de onda del láser empleado para excitar el cristal. Cuando eso ocurre, la cavidad se vacía y llena de fotones de forma periódica, lo que genera una fuerza óptica pulsada a cierta frecuencia. Variando los parámetros del láser de bombeo, resulta posible sintonizar dicha frecuencia entre algunos megahercios y algunas centenas de megahercios, lo que permite que la fuerza óptica entre en resonancia con algunos de los modos mecánicos propios del cristal. Además, si se satisfacen ciertos requisitos, el mecanismo descrito permite bombear dichos modos de forma eficiente, compensar las pérdidas por disipación de energía mecánica y llevarlos a un régimen conocido como «láser mecánico», o láser de fonones. Esto significa que la oscilación asociada a un modo mecánico particular es coherente, monocromática, de gran amplitud y, lo más importante, autosostenida.

OPTOMECÁNICA Y CRIPTOGRAFÍA: Un trabajo reciente ha demostrado la posibilidad de emplear cristales optomecánicos (*arriba*) para modular de forma caótica las señales ópticas que se transmiten por una fibra (*gráficas*). Una vez codificada la señal original en el emisor, esta podría recuperarse en el receptor por medio de un segundo cristal idéntico al primero y sincronizado con él. Dicha posibilidad abre la puerta a la creación de una nueva tecnología de comunicaciones seguras de bajo coste.

ADAPTADO DE «NONLINEAR DYNAMICS AND CHAOS IN AN OPTOMECHANICAL BEAM», DANIEL NAVARRO-URRIOS ET AL., *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 8, ART. 14965, ABRIL DE 2017.

Caos e información

Sin embargo, la complejidad de estos sistemas permite generar comportamientos dinámicos más exóticos que los descritos hasta ahora. Además del autopulsado y del láser mecánico, resulta posible observar multiestabilidad y caos. La multiestabilidad permite la coexistencia de varios estados (como el autopulsado y el láser mecánico) para una misma combinación de parámetros del láser de bombeo. Pero, sobre todo, es la dinámica caótica (es decir, la aparición de una gran sensibilidad en el comportamiento del sistema ante pequeñas variaciones en las condiciones iniciales) lo que ha abierto numerosas posibilidades de investigación.

Hasta ahora, las dinámicas caóticas en sistemas optomecánicos habían sido relativamente poco exploradas, ya que se restringían a sistemas en los que los requisitos técnicos para su observación eran mucho más estrictos, al no estar basados en el fenómeno del autopulsado explicado con anterioridad. En este sentido, nuestros resultados abren dos frentes. Por un lado, estas estructuras optomecánicas se perfilan como excelentes bancos de pruebas para la verificación de predicciones teóricas de sistemas no lineales complejos. Por otro, la dinámica caótica puede explotarse en el ámbito de las comunicaciones seguras, con la ventaja de que los objetivos que deben lograrse no parecen muy alejados de la tecnología actual.

El sistema de comunicación más simple, en cuyo desarrollo nos hallamos inmersos en estos momentos, consistiría en dos cristales optomecánicos nominalmente idénticos, uno de los cuales se situaría en el punto emisor y otro en el receptor. Después, ambos serían llevados a un régimen caótico equivalente; es decir, uno en el que los parámetros de los láseres de bombeo fuesen similares. En tal caso, la señal de salida de cada uno de ellos quedaría modulada siguiendo la dinámica caótica propia del cristal en cuestión.

Si una pequeña parte de la señal de salida de cada uno de los cristales alimenta al otro, ambos acabarán sincronizando sus dinámicas caóticas. Obtendríamos así un sistema de comunicación bidireccional en el que el mensaje que desea transmitirse de manera segura, S, podría «esconderse» en medio de la señal caótica, C. De este modo, si del punto emisor parte una señal combinada $S + C$, el mensaje S podría extraerse en el receptor sin más que sustraer la contribución caótica C generada por el cristal optomecánico emplazado allí. La sincronización de ambas cavidades presentaría, además, la ventaja de que cualquier posible intercepción de la señal combinada, $S + C$, sería detectada de inmediato tanto en el emisor como en

el receptor, dado que alteraría la dinámica de ambas estructuras.

La investigación presentada aquí se integra en el proyecto europeo PHENOMEN. Coordinado por los dos autores de este artículo, este consorcio se encuentra formado por tres centros de investigación líderes en el campo, tres universidades europeas y una pyme tecnológica. Su objetivo a largo plazo consiste en aprovechar el potencial de los sistemas optomecánicos para establecer las bases de una nueva tecnología de la información y, en concreto, construir los primeros detectores y fuentes de fonones controlados por medios ópticos.

Por lo que se refiere al sistema de comunicaciones propuesto aquí, aún queda trabajo por hacer. Aunque la parte más difícil ya se ha logrado, ahora es necesario conseguir la sincronización de dos cristales optomecánicos en el régimen caótico: una característica clave que demostraría de manera definitiva las aplicaciones criptográficas de nuestros cristales optomecánicos. Una vez obtenida, el último paso consistirá en producir chips integrados que contengan las guías de onda necesarias para el acoplamiento de los cristales optomecánicos con el exterior. La idea final es tener todo integrado, incluidos los láseres de bombeo y algunos elementos electrónicos que controlarían el enrutamiento óptico a un cristal optomecánico específico. En un caso ideal, los chips se comunicarían con el exterior únicamente a través de un puerto de entrada y otro de salida de fibra óptica.

Daniel Navarro-Urrios
y ***Clivia M. Sotomayor Torres***
son investigadores del Instituto Catalán de Nanociencia y Nanotecnología de Barcelona y coordinadores del proyecto europeo PHENOMEN.

PARA SABER MÁS

Cavity optomechanics. Markus Aspelmeyer, Tobias Kippenberg y Florian Marquardt en *Review of Modern Physics*, vol. 86, págs. 1391-1452, octubre de 2014.
A one-dimensional optomechanical crystal with a complete phononic band gap. Jordi Gomis-Bresco et al. en *Nature Communications*, vol. 5, art. 4452, julio de 2014.
Nonlinear dynamics and chaos in an optomechanical beam. Daniel Navarro-Urrios et al. en *Nature Communications*, vol. 8, art. 14.965, abril de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

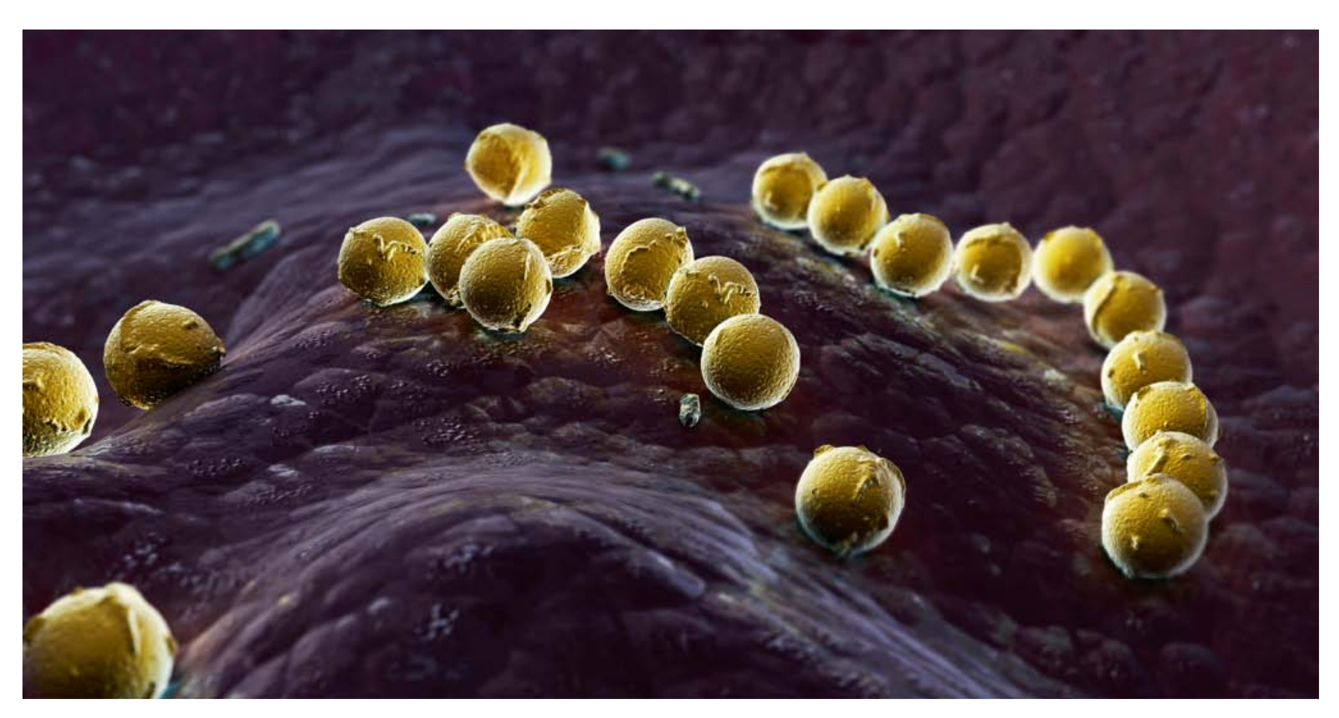
Conexiones para una red cuántica. Mika A. Sillanpää y Pertti J. Hakonen en *IyC*, enero de 2015.

MICROBIOLOGÍA

Factores que alteran el microbioma humano

El estilo de vida influye en la composición y función de los microorganismos que habitan en nuestro cuerpo

CELIA MÉNDEZ-GARCÍA, ANDRÉS MOYA Y MANUEL FERRER



LOS ESTREPTOCOCOS son bacterias muy sensibles a las alteraciones asociadas a nuestro estilo de vida actual. Aunque algunas especies de este grupo causan enfermedades graves, otras resultan beneficiosas y constituyen microbiomas en la boca, la piel, el intestino y el aparato respiratorio.

Cada una de las partes de nuestro cuerpo (las manos, los pies, los codos, la boca, las cavidades vaginal y urinaria, el aparato respiratorio, los intestinos...) cuenta con un ecosistema propio habitado por microorganismos (sobre todo bacterias) de diversas especies. Es lo que se conoce como microbiota o microbioma (ambos términos se emplean a modo de sinónimos, aunque el segundo hace referencia a la totalidad de los genes microbianos del ecosistema).

Hace pocos años creíamos que el genoma humano era nuestro elemento más importante, lo que definía las células, los órganos y los procesos químicos que nos mantienen con vida. Sin embargo, hemos descubierto que nuestros microorganismos poseen muchos de los genes que necesitamos. Las investigaciones indican que al menos 8 millones de genes microbianos coexisten con los 23.000 genes humanos. Codificar proteínas que trabajan para nosotros, expulsar invasores o controlar la respuesta inmunitaria y el metabolismo (digerir alimentos y producir vitaminas) son tan solo algunas de las labores desempeñadas por nuestros genes microbianos.

Los microorganismos, junto con sus genes, han evolucionado con nosotros. Si bien nuestro origen evolutivo es incierto, los estudios actuales indican la existencia de un ancestro microbiano universal, compartido por todos los dominios de la vida que conocemos. Hoy nuestras células conviven con un universo microscópico de descendientes del mismo antepasado común. Esta coexistencia pacífica es el resultado de complejos mecanismos moleculares de adaptación mutua.

En nuestro grupo de investigación nos hemos interesado por los factores que pueden alterar nuestra relación con los microorganismos. En concreto, nos hemos fijado en las situaciones que hacen variar la composición y función de nuestro microbioma en distintas partes del organismo.

Convivencia ancestral

La transferencia de microbios entre madres e hijos a través del canal del parto es la forma que tiene la naturaleza de asegurarse de que se hereden de una generación a otra. Después del nacimiento, el número de bacterias empieza a aumentar y, a los tres años de edad, las comunidades microbianas alcanzan su madurez y diversidad máximas.

Pero, aunque desde la aparición de *Homo sapiens*, hace unos 200.000 años, hemos estado evolucionando conjuntamente con nuestros microorganismos, en los últimos 150 años la civilización occidental ha ejercido un fuerte impacto en ellos a través de factores tales como el estilo de vida industrializado, los antibióticos o las cesáreas. El progreso se ha cobrado su precio en la población microbiana: hemos perdido grupos de microorganismos con los que habíamos evolucionado. Por ejemplo, debido a una simple amigdalitis o infección de oído, un niño de tan solo dos años puede haber recibido unas diez dosis de antibióticos que no solo eliminan las bacterias perjudiciales, sino que a la vez provocan una pérdida de microorganismos beneficiosos. La comida que ingerimos y otros medicamentos también influyen diariamente en nuestra microbiota.

No hay manera de saber hasta qué punto se ha producido la disminución de los distintos géneros microbianos a lo largo de la evolución, ya que resulta imposible contar con las muestras pertinentes para comprobarlo. Pero sí se ha podido deducir a partir de los análisis realizados en poblaciones indígenas, que sufren una menor exposición a los hábitos modernos, y a partir de estudios con roedores a los que se ofrece una dieta similar a la nues-

¿QUÉ MODIFICA NUESTRO MICROBIOMA?

LAS ENFERMEDADES, los antibióticos y otros factores afectan en mayor o menor medida a las comunidades microbianas que residen en nuestro cuerpo. Todos los factores tienen en común que reducen la presencia de diez bacterias, consideradas supersensibles.

Enfermedades

- Obesidad y sobrepeso
- Síndrome metabólico
- Diabetes
- Enfermedades inmunitarias y autoinmunitarias (lupus y enfermedad celíaca, psoriasis)
- Enfermedad de Crohn y otras enfermedades inflamatorias del intestino
- Enfermedad cardiovascular
- Enfermedades asociadas al hígado, riñón y pulmón
- Enfermedades neurodegenerativas (alzhéimer, párkinson, escleroris múltiple)
- Trastornos mentales (autismo, depresión y ansiedad)
- Cáncer
- Infecciones por patógenos (*Clostridium difficile*, vaginosis, cistitis)
- Infecciones víricas (herpes, VIH)
- Enfermedades cutáneas (dermatitis)
- Enfermedades dentales
- Enfermedad infecciosa gangrenosa

Tratamientos antibióticos

- Betalactámicos (amoxicilina, ceftriaxona, cefalosporina, ácido clavulánico, penicilina)
- Aminoglicósidos (gentamicina)
- Fluoroquinolonas (ciprofloxacino)
- Tetraciclinas (doxiciclina, tetraciclina)
- Macrólidos (erotrimicina, espiramicina/rhodogil)
- Glucopéptidos (vancomicina)
- Nitroimidazoles (metronidazol/rhodogil)
- Rifamicinas
- Sulfonamidas
- Lincosamidas
- Otros (cloranfenicol, rifampicina)



Otros factores

- Edad y envejecimiento
- Intervenciones en la dieta
- Lactancia con leche de fórmula
- Embarazo y duración del período de gestación
- Menopausia y posmenopausia
- Medicamentos distintos de los antibióticos
- Consumo de alcohol y tabaco
- Contaminantes químicos y ambientales
- Cambios en el lugar de residencia
- Estancia en las unidades de cuidados intensivos
- Intervenciones quirúrgicas
- Ritmos circadianos

Bacterias supersensibles

- *Enterococcus*
- *Streptococcus*
- *Lactobacillus*
- *Escherichia*
- *Bifidobacterium*
- *Prevotella*
- *Bacteroides*
- *Clostridium*
- *Blautia*
- *Faecalibacterium*







tra actual. Además, ahora sabemos que los adolescentes de hoy presentan una diversidad microbiana ligeramente inferior a la de sus padres y marcadamente inferior a la de sus abuelos y bisabuelos. De hecho, se estima que nuestros hexabuelos (la sexta generación anterior a la nuestra) tendrían comunidades microbianas más parecidas a las de los humanos primitivos que a las nuestras, y que sería a partir de las siguientes generaciones cuando habría empezado a reducirse progresivamente la diversidad microbiana. Varios trabajos apoyan esta idea, entre ellos el de Erica D. Sonneburg, de la Universidad Stanford, y sus colaboradores, publicado en *Nature* en 2016.

Factores perjudiciales

Es difícil establecer qué es una microbiota normal y saludable, pero sí existe un consenso de que cuantas más especies microbianas albergue, y mayor equilibrio haya entre ellas, más ventajas ofrecerá a nuestra salud. Mediante el estudio de los factores individuales que pueden modificar tal equilibrio podremos llegar a entender cuáles perjudican a nuestros microbios y en qué grado. Con ese propósito, emprendimos un estudio de revisión basado en más de 145 publicaciones científicas recientes que analizaban distintas perturbaciones en el microbioma humano. Publicamos nuestros resultados en *FEMS Microbiology Reviews*.

En primer lugar, confeccionamos una lista de los diversos factores examinados, cada uno de los cuales difería en su naturaleza, fuerza y duración. Comprobamos que dichos factores se englobaban en tres grupos: enfermedades, antimicrobianos y otros. Al menos 105 enfermedades, 68 tratamientos antibióticos y otros 22 tipos de factores muy diversos, como la edad, la dieta, la medicación, el tabaquismo, el clima, la zona geográfica donde se reside, la exposición a productos tóxicos y al polvo, se asocian a cambios en nuestros microbios. Las enfermedades producen más alteraciones que la ingesta de antibióticos; estos, más que otros medicamentos, y estos, a su vez, más que la dieta y otros factores.

Los cambios en la composición de las comunidades microbianas pueden deducirse a partir de la secuenciación de un gen que codifica la subunidad 16S del ribosoma microbiano, lo que permite identificar las especies bacterianas presentes en una comunidad. Este gen se considera un cronómetro evolutivo: su ausencia se asocia directamente con la desaparición de una especie. Hemos demostrado así que los factores mencionados arriba provocan cambios en 258 géneros microbianos (principalmente bacterias) de los 5000 que habitan nuestro cuerpo. Es decir, solo una pequeña proporción de todas las bacterias (un 5 por ciento) se ven afectadas por nuestro estilo de vida actual.

Un análisis comparativo revela que, de estos 258 géneros, 10 están fuertemente influenciados por cualquiera de los factores analizados hasta la fecha, ya sean enfermedades, tratamientos con antibióticos u otros. La abundancia de estas 10 bacterias supersensibles se ve fuertemente disminuida frente a cualquier perturbación, por mínima que sea. Algunas de ellas, tales como *Bifidobacterium* y *Lactobacillus*, son imprescindibles para el correcto funcionamiento de nuestro cuerpo. Su ausencia se relaciona con enfermedades inflamatorias del intestino, trastornos hepáticos, problemas cardiovasculares o alteraciones psicológicas, y su administración en forma de probióticos ha demostrado mejorar algunos de los síntomas asociados a estas enfermedades.

Por tanto, un análisis clínico que permitiera detectar la presencia o ausencia de esas bacterias en las personas podría ayudar a prevenir las complicaciones asociadas a su déficit, el cual puede darse en cualquier momento de nuestra vida. El diseño de nuevos alimentos probióticos enriquecidos en algunas de estas bacterias o de dietas o terapias que favorecieran su crecimiento podría ser una opción. No solo se evitarían los problemas de salud a corto plazo asociados a dicho déficit, sino que supondrían también nuevas fuentes de transferencia de microorganismos beneficiosos de las madres a sus futuros bebés.

Una respuesta desigual

No todos los microbios con los que convivimos son activos. Una gran parte de las bacterias que colonizan el colon de una persona sana están muertas, latentes o inactivas, y solo un 20 por ciento están vivas y metabólicamente activas. Son estas últimas las que de forma más notable sustentan nuestro día a día y nos mantienen sanos, según describió el grupo de uno de los autores (Moya) en un artículo publicado en *PLoS ONE* en 2011.

Asimismo, hay microbios que se activan o desactivan solo bajo unas circunstancias y no otras. Por tanto, en el futuro será importante no solo descifrar qué bacterias perdimos durante la evolución como consecuencia de nuestro estilo de vida, sino también valorar bajo qué condiciones nuestros microbios se activan o desactivan en el contexto de distintas perturbaciones o enfermedades, a fin de aportar información en el diagnóstico de dichas enfermedades. Ello puede ayudar a tomar decisiones sobre el tratamiento más adecuado que podría aplicarse en una situación clínica real.

De cara a nuestra salud, nos convendría identificar todos nuestros microorganismos y saber cómo reaccionan frente a los cambios en el entorno. Al menos ahora conocemos algunas de las bacterias que, debido a su alta vulnerabilidad, corren más riesgo de desaparecer como consecuencia de nuestro estilo de vida y nuestras enfermedades, y sabemos también cómo evitar su desaparición.

Celia Méndez-García *es investigadora del Instituto Carl R. Woese de Biología Genómica, en Urbana (EE.UU.).*

Andrés Moya *es catedrático de genética de la Universidad de Valencia e investigador del Instituto de Biología Integrativa y de Sistemas (centro mixto de la misma universidad y del CSIC).*

Manuel Ferrer *es investigador del Instituto de Catálisis, del CSIC, en Madrid.*

PARA SABER MÁS

Functional redundancy-induced stability of gut microbiota subjected to disturbance. A. Moya y M. Ferrer en *Trends in Microbiology*, vol. 24, n.º 5, págs. 402-413, 2016.
Revised estimates for the number of human and bacteria cells in the body. R. Sender, S. Fuchs y R. Milo en *PLoS Biology*, vol. 14, art. e1002533, 2016.
Exploring the human microbiome from multiple perspectives: Factors altering its composition and function. D. Rojo et al. en *FEMS Microbiology Reviews*, vol. 41, n.º 4, págs. 453-478, julio de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

El ecosistema microbiano humano. Jennifer Ackerman en *IyC*, agosto de 2012.
Nuestro segundo genoma. Francisco Guarner en *IyC*, diciembre de 2012.

COSMOLOGÍA

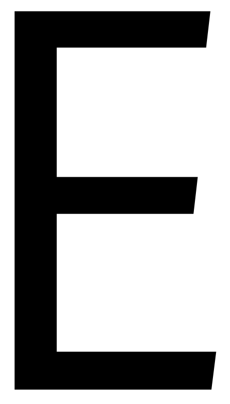
EXPLOSIONES CÓSMICAS, LA VIDA Y EL MULTIVERSO

La existencia de vida compleja en el cosmos parece estar fuertemente amenazada por cierto tipo de estallidos estelares. Ello podría explicar la paradoja de Fermi y sugiere que vivimos en un universo muy especial

Raúl Jiménez



Raúl Jiménez es cosmólogo y profesor ICREA de investigación en el Instituto de Ciencias del Cosmos de la Universidad de Barcelona. Ocupa también una plaza de profesor visitante en el Colegio Imperial de Londres y en el Instituto de Ciencia Computacional Aplicada de Harvard.



En 1950, el gran físico italiano Enrico Fermi se planteó la siguiente pregunta. Si nuestra galaxia contiene unos 100.000 millones de estrellas, y si suponemos que nuestro sistema solar no es una excepción, el número de planetas con vida presentes en la Vía Láctea debería ser exorbitante. En tal caso, en algunos de ellos tendría que haberse desarrollado vida inteligente que, antes o después, se habría extendido por toda la galaxia. Entonces, ¿por qué no hemos detectado ninguna civilización extraterrestre? ¿Por qué no han contactado con nosotros? **¿Dónde están?**

Este razonamiento se conoce como «paradoja de Fermi» y, aunque ha sido fuente de todo tipo de hipótesis, hasta hoy carecemos de una explicación satisfactoria. En los últimos años, sin embargo, hemos aprendido que la vida compleja en el universo podría ser mucho menos común de lo que se pensaba debido a un tipo concreto de cataclismo cósmico: los estallidos de rayos gamma. Estas explosiones estelares se encuentran entre los fenómenos más violentos del universo, y sus devastadores efectos se dejan sentir a miles de años luz de distancia. Aunque fueron observados por primera vez en los años sesenta del pasado siglo, solo hace poco hemos comenzado a atisbar hasta qué punto su proliferación puede llegar a comprometer la existencia de vida en galaxias enteras.

Por sí solos, los estallidos de rayos gamma podrían ayudar a explicar la paradoja de Fermi. Sin embargo, las consecuencias parecen ir más allá. Un análisis cuidadoso revela que tanto el número como la distribución de estas explosiones estelares parecen hallarse íntimamente ligados a las leyes fundamentales de nuestro universo. Un cosmos ligeramente distinto del que observamos, o bien carecería de galaxias (y, por tanto, de planetas y vida), o bien estas abundarían pero serían hostiles a la vida compleja debido, precisamente, a un exceso de estallidos de rayos gamma.

Este resultado parece confirmar, por medio de un fenómeno astrofísico hasta ahora inexplorado, que vivimos en un universo extremadamente afinado para permitir la existencia de vida compleja, al menos tal y como la conocemos en la Tierra. Sumado a algunos argumentos de carácter estadístico, todo lo anterior podría estar diciéndonos algo sobre una de las ideas más controvertidas de la ciencia actual: la hipótesis del multiverso. El camino que nos lleva a vincular la presencia de vida en el cosmos con los estallidos de rayos gamma y la existencia de muchos universos conecta la física a las más diversas escalas, desde las leyes cuánticas y la química hasta los procesos astrofísicos y la estructura del universo como un todo.

EL ORIGEN DE LAS GALAXIAS

Cuando miramos al cielo y vemos que hay galaxias, podemos preguntarnos: ¿cómo se crearon? ¿Por qué el universo tiene estructura y no es uniforme y sin rugosidades? ¿Qué generó las grandes acumulaciones de materia que observamos hoy? La respuesta es sorprendente y constituye uno de los principales descubrimientos de la cosmología moderna: las grandes estructuras del universo tienen su origen en las fluctuaciones cuánticas del cosmos primitivo. Son el resultado de la incertidumbre, del temblor del vacío. Son el resultado de la nada.

En 1981, los físicos soviéticos Gennady Chibisov, ya fallecido, y Viatcheslav Mukhanov, hoy en el Centro Arnold Sommerfeld de Física Teórica de Múnich, propusieron que las galaxias y los cúmulos de galaxias se formaron a partir de las fluctuaciones cuánticas a las que estaba sometido el universo justo después de la gran explosión. Dichas fluctuaciones fueron posteriormente amplificadas por el proceso de inflación cósmica, la fase de expansión exponencial del espacio que, según creemos, tuvo lugar durante la primera fracción de segundo del universo. Ello dio lugar a irregularidades en la distribución de materia que, millones de años más tarde, acabarían convirtiéndose en los vastos vacíos cósmicos y los enormes cúmulos de galaxias que vemos hoy.

Después de casi cuarenta años, y gracias a las observaciones del fondo cósmico de microondas efectuadas por los satélites

EN SÍNTESIS

Los estallidos de rayos gamma (GRB) son explosiones estelares de un enorme poder destructivo. Varios trabajos recientes han demostrado que su proliferación puede poner en peligro la existencia de vida compleja en galaxias enteras.

Solo las zonas exteriores de las grandes galaxias parecen estar a salvo de los GRB. Para ello, sin embargo, es necesario que una galaxia de gran tamaño no tenga demasiadas galaxias enanas a su alrededor. Así ocurre en la Vía Láctea.

El resultado anterior podría explicar la paradoja de Fermi: si la vida en nuestra galaxia fuese tan común como cabría pensar, ya tendríamos que haber detectado indicios de civilizaciones extraterrestres. ¿Por qué no ocurre así?

La condición de que el universo contenga galaxias con regiones habitables limita sobremanera la historia de expansión del cosmos. Dicho resultado admite una interpretación natural en el contexto de la hipótesis del multiverso.

WMAP, de la NASA, y Planck, de la ESA y con participación de la NASA, sabemos que es muy probable que la teoría de Chibisov y Mukhanov sea correcta. No deja de resultar sorprendente que el hecho de que la mecánica cuántica sea una ley física, y que, por tanto, la incertidumbre rija nuestra descripción de la naturaleza, sea la razón de la existencia de las galaxias. Las leyes que gobiernan el universo a escala subatómica son también las responsables de su estructura a las mayores escalas.

La inflación desempeña un papel clave en todo lo anterior, ya que fue precisamente la descomunal expansión primigenia del espacio lo que hizo que las fluctuaciones cuánticas iniciales creciesen hasta cobrar proporciones cósmicas. La teoría inflacionaria fue desarrollada a finales de los años setenta y principios de los ochenta por los también soviéticos Alexei Starobinsky, del Instituto Landau de Física Teórica de Moscú; Andrei Linde, en la actualidad en Stanford; el propio Mukhanov, y el estadounidense Alan Guth, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (si bien los orígenes de la teoría se remontan a los artículos de Bill McCrea en 1951 y Erast Gliner en 1965, este último aún vivo). Hoy podemos decir que la teoría ha superado todos los tests observacionales. No solo explica de manera satisfactoria el origen de las estructuras cósmicas, sino también por qué a grandes escalas el universo es plano (sin curvatura aparente), así como numerosas propiedades no evidentes del fondo cósmico de microondas, la luz liberada poco después de la gran explosión. Hoy hemos medido las características de esta radiación con gran detalle y sabemos que, aunque su temperatura es muy uniforme en todo el cielo, presenta pequeñas irregularidades, del orden de pocas partes por cien mil. Esas variaciones reflejan las inhomogeneidades en la distribución de materia en el universo primitivo: las semillas de las galaxias actuales. Hasta ahora, el estudio de las irregularidades del fondo cósmico ha corroborado tanto esta como el resto de las predicciones de la teoría inflacionaria.

UNIVERSOS BAYESIANOS

Sin embargo, y a pesar de sus éxitos, la teoría inflacionaria entraña una predicción que genera no poca controversia entre la comunidad científica. A principios de los años ochenta, Linde se percató de que la inflación no solo implicaba que las galaxias actuales tienen su origen en las fluctuaciones del vacío, sino que el propio universo es el resultado de fluctuaciones cuánticas. Una consecuencia es que la inflación no genera solo un universo, sino una infinidad de ellos: el llamado multiverso.

Todo modelo inflacionario postula la existencia de un campo de energía, el inflatón, el cual es el responsable de la expansión exponencial del espacio durante los primeros instantes del cosmos. La dinámica del inflatón puede visualizarse como la de una bola que rueda por una colina. Cuando el objeto se encuentra en la cima, posee una gran energía potencial; en el caso del inflatón, es dicha energía la que estira el espacio al vertiginoso ritmo que predice la teoría. Tras rodar y llegar al valle, la bola pierde su energía potencial; trasladado a lo que ocurre en nuestro universo, ese momento marca el final del proceso inflacionario. A partir de entonces el universo sigue expandiéndose, pero al ritmo mucho más moderado que predice la teoría original de la gran explosión.

No obstante, el inflatón es un campo cuántico y, como tal, se encuentra sujeto al principio de incertidumbre de Heisenberg. Es precisamente esta incertidumbre la que genera las fluctuaciones que, más tarde, darán lugar a las galaxias. Pero ese comportamiento afecta también a la propia dinámica del inflatón: si retomamos la analogía de la bola, eso quiere decir que, en vez de rodar todo el tiempo hacia abajo, en ocasiones el objeto puede detenerse o incluso subir brevemente de manera espontánea. Esto implica que, en cada región del espacio, la inflación empieza y termina en distintos momentos. Nosotros vivimos en una «burbuja» en la que la inflación se detuvo en cierto instante. Pero, en otras zonas, el espacio siguió hinchándose y fue generando otras burbujas. Como consecuencia, la teoría inflacionaria implica la existencia de un número infinito de universos.

Estos «universos burbuja» carecen de conexión causal entre sí, por lo que al nuestro nunca podrá llegar información procedente de otro. Es aquí donde comienza la controversia. Un razonamiento válido es que, si acerca de algo no podemos hacer ningún tipo de experimento ni extraer ningún dato, en la práctica es como si no existiese. Y, no siendo verificable, su postulación no pertenece al ámbito de la ciencia, sino al de la filosofía [*véase* «La burbuja de la inflación cósmica», por Anna Ijjas, Paul Steinhardt y Abraham Loeb; Investigación y Ciencia, abril de 2017]. Sin embargo, la existencia del multiverso sí puede tener algunas consecuencias observables. La respuesta reside en la estadística y la probabilidad.

Mi colaborador Fergus Simpson, del Instituto de Ciencias del Cosmos de la Universidad de Barcelona (ICCUB), suele explicarlo con el siguiente ejemplo: imagine que ve una mesa en la que hay un grano de café justo en el borde. ¿Cuál es la causa más probable de que se encuentre ahí? Tal vez alguien decidiese colocarlo con sumo cuidado en dicho lugar. No obstante, lo más razonable sería pensar que se han derramado una gran cantidad de granos de café y que el resto están en el suelo. Este tipo de argumentación estadística recibe el nombre de inferencia bayesiana. Al contrario que el enfoque frecuentista (el que todos aprendemos en la escuela, basado en definir las probabilidades a partir de la fracción de las veces que se observa una característica en una muestra muy amplia), la inferencia bayesiana permite extraer conclusiones con muy pocos datos o incluso con uno solo. En lo que sigue, veremos que es posible argumentar que el universo observable se parece mucho a nuestro grano de café.

Un ejemplo histórico fascinante que ilustra las ventajas de esta manera de razonar es el llamado problema de los tanques alemanes. Hacia el final de la Segunda Guerra Mundial, los Aliados necesitaban saber cuántos tanques Panther producían los nazis. Según los servicios de espionaje, la cifra debía rondar los 1400 al mes: una cantidad muy elevada que representaba un gran peligro. Los matemáticos, sin embargo, decidieron estimar la producción a partir de los números de serie de los tanques destruidos. Esos números eran bajos, y su distribución les llevó a concluir que lo más probable era que los alemanes estuviesen fabricando unos doscientos tanques al mes. Una vez concluida la guerra, los registros confirmaron que, en efecto, la producción rondaba los 270 tanques mensuales [*véase* «El problema de los tanques alemanes», por Bartolo Luque; Investigación y Ciencia, diciembre de 2013].

En un espíritu similar, el lector puede jugar a hacer inferencia bayesiana cuando toma el autobús. Imagine que llega a una urbe desconocida y que el primer autobús al que sube es el número 27. ¿Cuantas líneas hay en la ciudad? Parece poco plausible que haya miles de ellas, ya que entonces lo más probable sería que, al tomar un vehículo al azar, este tuviese un número de tres o cuatro cifras. Si su autobús era el número 27, parece razonable deducir que tal vez haya cien o doscientas líneas, pero no muchísimas más. Es importante resaltar que en estos ejemplos no hemos tenido que muestrear toda la población de tanques ni

¿Una explicación a la paradoja de Fermi?

En 1950, el físico italiano Enrico Fermi razonó que, si la vida inteligente fuese un fenómeno común en el universo, antes o después tendría que haber aparecido una civilización que se extendiese por toda la galaxia. Entonces, ¿por qué no hemos detectado ninguna señal de su existencia? La respuesta podría hallarse en cierto tipo de explosiones estelares: los estallidos de rayos gamma (GRB). Varios trabajos recientes han señalado que la vida compleja podría ser mucho menos común de lo que se pensaba debido al devastador efecto de estas explosiones.

Explosiones mortales

Los GRB se encuentran entre los fenómenos más violentos del universo: en pocos segundos, pueden liberar tanta energía como el Sol durante toda su vida. Generados principalmente en explosiones de supernova de estrellas muy masivas, sus devastadores efectos pueden propagarse a miles de años luz de distancia.

Estallido de rayos gamma (GRB)

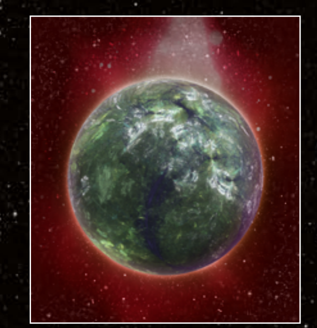
Efectos sobre la vida compleja

Si la radiación de un GRB alcanzase un planeta como la Tierra, la capa de ozono quedaría destruida en pocos días. Ello dejaría a los organismos terrestres expuestos a la radiación ultravioleta y afectaría a todas las formas de vida dependientes de la fotosíntesis.

Sin GRB



Con GRB



Galaxia de gran tamaño

Galaxia enana

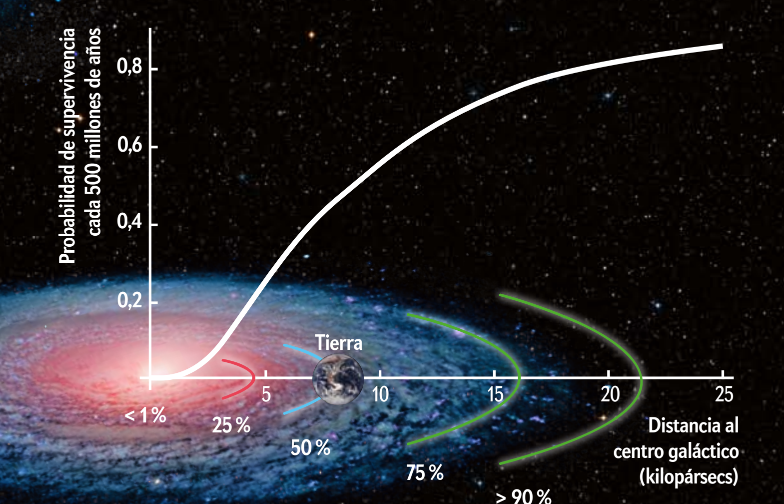
Distribución en galaxias

Los GRB se producen con mayor frecuencia en galaxias pequeñas y con una baja proporción de elementos químicos pesados. En las grandes galaxias, como la Vía Láctea, se generan preferentemente en los centros galácticos (*rojo*), donde la densidad de estrellas es muy elevada. Las zonas externas (*azul*) se encuentran relativamente a salvo de sus efectos, pero en ellas el número de planetas es también menor.



Probabilidad de supervivencia

En una galaxia como la Vía Láctea, la probabilidad de supervivencia de la vida compleja en un planeta depende de su distancia al centro galáctico. Para un mundo como la Tierra, situado en el exterior, la probabilidad de que un GRB destruya la capa de ozono ronda el 50 por ciento cada 500 millones de años. Se cree que la gran extinción del Ordovícico, ocurrida hace unos 450 millones de años, pudo estar causada por un GRB.



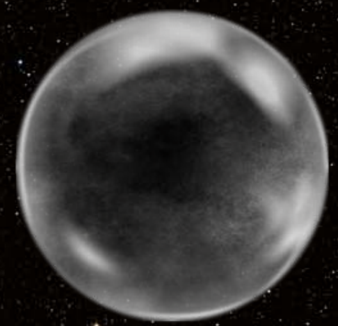
Un universo poco probable

Las simulaciones por ordenador han demostrado que la existencia de grandes galaxias con zonas a salvo de GRB depende fuertemente del valor que toma un parámetro fundamental de la naturaleza: la constante cosmológica (Λ). Desde 1998 se sabe que este parámetro es muy pequeño pero distinto de cero, y que su efecto equivale al de una «gravedad repulsiva» que tiende a impedir que la materia se agregue en galaxias. El valor observado de la constante cosmológica parece estar finamente ajustado para permitir la existencia de vida compleja.

Constante cosmológica demasiado elevada

En los años ochenta, Steven Weinberg, de la Universidad de Texas en Austin, argumentó que, si la constante cosmológica fuese demasiado grande, su efecto repulsivo sobre la materia habría impedido que se formasen las galaxias. Un universo así carecería de planetas y, por tanto, también de vida.



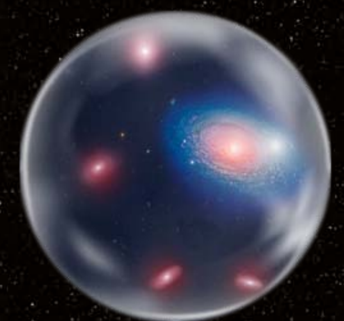


Universo sin galaxias

Constante cosmológica apta para la vida

El valor observado de la constante cosmológica es tal que permite la existencia de galaxias como la Vía Láctea: grandes estructuras con pocas galaxias enanas a su alrededor y con regiones relativamente a salvo de los efectos de los GRB.





Universo con galaxias aisladas

Constante cosmológica demasiado baja

En un universo con una constante cosmológica demasiado baja abundarían las galaxias y los planetas. Sin embargo, las grandes galaxias, como la Vía Láctea, estarían rodeadas por enjambres de galaxias enanas. Los GRB que se produjesen en estas últimas alcanzarían con facilidad las zonas externas de las galaxias de gran tamaño, lo que impediría la emergencia de vida compleja.





Universo con exceso de galaxias

Pocos universos habitables

Los argumentos anteriores permiten calcular la probabilidad de que haya vida inteligente en el universo en función del valor que toma la constante cosmológica (*azul*). Solo un estrecho intervalo de valores parece resultar compatible con la existencia de vida compleja en el cosmos.

OBSERVATORIO EUROPEO AUSTRAL/A. ROQUETTE (*estallido de rayos gamma*); © ISTOCKPHOTO/IGORKIRILLOV (*planeta*); *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA* (*inserto efectos GRB y universos burbuja*); ROBERT GENDLER/HUBBLE/SUBARU (*galaxia espiral*); ESA/HUBBLE, NASA, D. CALZETTI/UMASS Y EQUIPO LEGUS (*galaxia enana*); RAÚL JIMÉNEZ (*gráficas*)

de autobuses. En realidad, basta con un solo dato para poder estimar algunas propiedades de la muestra completa.

Este tipo de inferencia puede también emplearse para intentar deducir algunas propiedades del multiverso. Es cierto que, por definición, no tenemos acceso a ninguno de los otros universos ni podemos hacer experimentos. Pero por fortuna disponemos del nuestro, cuyas propiedades (su «número de serie») sí podemos medir. Una de esas propiedades guarda relación con los estallidos de rayos gamma y sus efectos devastadores para la vida en el cosmos.

EXPLOSIONES MORTALES

Un frío día de febrero de 2014, mientras tomaba un café en el Café Einstein de Berna junto con mi colaborador Tsvi Piran, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, nos preguntamos si los estallidos de rayos gamma (GRB, por sus siglas en inglés) serían lo suficientemente abundantes para afectar a la vida en la Tierra. Poco antes habíamos concluido un trabajo en el que demostrábamos que estas explosiones cósmicas se producen preferentemente en galaxias mucho más pequeñas que la nuestra (unas cien veces menos masivas) y con una proporción más baja de elementos pesados (el término empleado por los astrónomos para referirse a los elementos químicos distintos del hidrógeno y el helio). Así pues, nos planteamos si el hecho de vivir en una galaxia de gran tamaño y con un alto contenido de elementos pesados nos habría protegido de la funesta radiación de los GRB.

Pero ¿qué son los GRB y por qué resultan potencialmente perjudiciales para la vida? El descubrimiento de estos estallidos de radiación de alta energía data de la Guerra Fría. En los años sesenta, EE.UU. sospechaba que la URSS podía estar llevando a cabo pruebas nucleares en el espacio, por lo que lanzó un satélite para detectar los rayos gamma que se emitirían en dichos ensayos. Al hacerlo, los científicos observaron un gran número de destellos de rayos gamma en distintas partes del cielo. No tardaron en percatarse de que semejantes explosiones eran de origen astronómico, pero qué las producía planteó un misterio que tardó décadas en descifrarse. Hoy sabemos que los GRB tienen un origen extragaláctico. Creemos que se producen en explosiones de supernova causadas por estrellas muy masivas (entre 20 y 30 veces mayores que el Sol), así como en colisiones de estrellas de neutrones. Lo que resulta indiscutible es que constituyen uno de los fenómenos más violentos del universo: en pocos segundos, un solo GRB puede liberar tanta energía como el Sol durante toda su vida.

Si una de estas explosiones se produjese en nuestra galaxia y a pocos miles de años luz de nuestro planeta, su primer efecto consistiría en destruir la capa de ozono. Esto se debe a que los rayos gamma ionizarían la molécula de nitrógeno, la cual se combinaría con los átomos de oxígeno del ozono para formar óxidos de nitrógeno. Todo ello ocurriría en cuestión de días. Sin capa de ozono, la superficie de la Tierra quedaría expuesta a la radiación ultravioleta del Sol, la cual resulta muy dañina para las proteínas en general y para el ADN en particular. Toda la vida que depende de la fotosíntesis se vería perjudicada, desde el plancton hasta las plantas terrestres, lo que afectaría a la cadena trófica global y causaría una extinción en masa.

Los universos con una constante cosmológica mucho mayor o menor que la que observamos no parecen ser aptos para la vida compleja

Ahora bien, ¿cuál es la probabilidad de que ocurra algo así? La frecuencia con la que se producen GRB en el universo había sido calculada poco antes por Piran y David Wanderman, de la Universidad Hebrea de Jerusalén. Una vez conocida la tasa total de GRB y la distribución de estas explosiones en los distintos tipos de galaxias, podíamos estimar la probabilidad de que una de ellas se produjese cerca de nuestro planeta. Este cálculo exige de nuevo usar la inferencia bayesiana, ya que no podemos repetir el experimento, solo observamos el cosmos.

Para nuestra sorpresa, hallamos que, cada 500 millones de años, hay una probabilidad de más del 50 por ciento de que un GRB destruya casi por completo la capa de ozono terrestre. Este dato reviste gran interés, puesto que implica que los GRB podrían explicar alguna de las extinciones masivas que en el pasado ha sufrido nuestro planeta. Es importante señalar que, de aquí en adelante, restringiremos nuestra atención a los organismos multicelulares complejos. Aunque los seres unicelulares existen en la Tierra desde hace unos 4000 millones de años, la vida compleja solo lleva un tiempo del orden de 1000 millones de años. Según nuestros cálculos, en ese período es muy probable que se produjera un GRB dañino para la vida en nuestro planeta, pero no más. De hecho, algunos investigadores han sugerido que la extinción del Ordovícico, la primera de las cinco grandes extinciones en la historia de nuestro planeta, hace unos 450 millones de años, pudo deberse a un GRB.

Llegados aquí, hemos de tener en cuenta un aspecto importante: la Tierra se encuentra en una posición privilegiada dentro de la Vía Láctea. La región central de la galaxia presenta una gran densidad de estrellas, lo que implica que las explosiones estelares potencialmente dañinas para la vida se suceden mucho más a menudo. El Sol, sin embargo, se halla alejado del centro galáctico, en una zona donde la densidad de estrellas es mucho más baja. Como consecuencia, los GRB catastróficos se producen con una frecuencia menor.

Es aquí donde podemos ver la conexión con la paradoja de Fermi. Aunque la Vía Láctea alberga más de 100.000 millones de estrellas, una gran parte de ellas residen en el centro galáctico, donde la probabilidad de supervivencia de la vida compleja —y, por tanto, inteligente— es muy reducida. Debido al devastador efecto de los GRB, solo las zonas externas de la galaxia, con muchas menos estrellas, parecen ser habitables.

Al considerar el universo en su conjunto, nuestro trabajo concluyó que solo el 10 por ciento de las galaxias (aquellas muy masivas y con una proporción elevada de elementos pesados) serían capaces de albergar vida compleja. En el 90 por ciento restante, la proliferación de GRB sería tan elevada que la vida compleja no tendría tiempo de evolucionar. Además, debido al tiempo que tardan en formarse las galaxias de gran tamaño, la vida tal y como la conocemos en la Tierra podría existir en el cosmos desde hace solo unos 5000 millones de años (en torno a un tercio de la edad actual del universo), pero no más.

UN MULTIVERSO HOSTIL

Fue entonces cuando mi colaboradora Licia Verde, del ICCUB, sugirió que nuestro resultado podía relacionarse con el valor de la constante cosmológica. Desde 1998 sabemos que este pa-

rámetro fundamental de la naturaleza, aunque muy pequeño, no es cero, y que su efecto equivale al de una «gravedad repulsiva». La constante cosmológica tiende a disgregar la materia y a acelerar la velocidad a la que se separan las galaxias. Hoy por hoy, uno de los mayores misterios de la cosmología consiste en entender por qué este parámetro toma precisamente el valor que toma y no otro.

La relación entre la constante cosmológica y el proceso de formación de galaxias es sencilla de entender. Dado que actúa como una gravedad repulsiva, cuanto mayor sea, más difícil resultará que la materia se acumule para formar estructuras. Y al contrario: valores más pequeños o incluso negativos de la constante cosmológica tendrían el efecto de generar más galaxias de las que vemos en la actualidad.

En los años ochenta, antes de que este parámetro se midiera experimentalmente, Steven Weinberg, de la Universidad de Texas en Austin, empleó un famoso argumento para acotar sus posibles valores. Razonó que, si la constante cosmológica fuese positiva y muy grande, su efecto repulsivo sobre la materia habría sido tal que las galaxias no habrían podido formarse. Por tanto, nuestro universo carecería de planetas y, por supuesto, también de vida. A partir de ello, Weinberg dedujo que la constante cosmológica no podría superar cierto límite. Años después, se comprobó que tomaba un valor cercano a la cota superior inferida por Weinberg.

Sin embargo, el argumento anterior no permite deducir un límite inferior para la constante cosmológica. Si su valor fuese menor de lo que es o incluso negativo, ello habría favorecido la formación de estructuras, por lo que en nuestro universo habría aún más galaxias, más planetas y, en principio, más vida.

Es aquí donde entran en juego las explosiones cósmicas. En un universo con más estructuras habría también más galaxias pequeñas, en las que los GRB se producen con mayor frecuencia. Además, las galaxias enanas tienden a rodear a las grandes galaxias. Antes hemos dicho que, para estar a salvo de los GRB, la vida inteligente debería surgir en un planeta situado en las afueras de una galaxia masiva. Sin embargo, si dicha galaxia se encuentra rodeada por un enjambre de galaxias enanas, las explosiones estelares que se produzcan en ellas afectarán con facilidad a las regiones externas de la galaxia central. En tal caso, no habría lugar seguro: el centro de una gran galaxia resultaría inhabitable debido a su gran densidad de estrellas, y las zonas exteriores también, debido a su cercanía a las galaxias satélite, profusas en GRB.

De hecho, la Vía Láctea parece ser muy especial en este sentido, ya que, contra lo que cabría esperar, no se halla rodeada por un gran número de galaxias enanas. Entre las más cercanas a nosotros se encuentran las nubes de Magallanes, las cuales están demasiado lejos para poner en peligro nuestro planeta con estallidos de rayos gamma. Así pues, podemos preguntarnos por qué no hay más galaxias enanas alrededor de la Vía Láctea. ¿Vivimos en un lugar especial? ¿Tiene algo que ver el valor de la constante cosmológica?

Junto con Piran, Simpson, Verde y Antonio Cuesta, también del ICCUB, nos propusimos cuantificar este efecto. Para ello necesitábamos simular el proceso de formación de galaxias en distintos universos, caracterizados por valores diferentes de la constante cosmológica, y comprobar cuán común era encontrar en ellos galaxias como la Vía Láctea: de gran tamaño, pero sin demasiadas galaxias enanas potencialmente peligrosas en sus inmediaciones. Este tipo de simulaciones no existían con anterioridad, y supuso un gran esfuerzo desarrollarlas. El resultado fue que, en efecto, si deseamos maximizar la probabilidad de vida inteligente en el universo, un valor de la constante cosmológica mucho menor que el que observamos se ve desfavorecido, ya que entonces resulta muy difícil encontrar una configuración como la de nuestro grupo de galaxias. Hasta entonces, ningún cálculo había conseguido imponer un límite inferior al valor de la constante cosmológica. Combinada con el límite superior deducido por Weinberg, esta cota deja un margen muy estrecho de valores para que la constante cosmológica resulte compatible con la existencia de vida compleja.

La conclusión a la que hemos llegado en nuestros trabajos es que los estallidos de rayos gamma desempeñan un papel fundamental a la hora de regular la vida compleja en el universo (vida, al menos, como la conocemos en la Tierra, basada en procesos fotosintéticos para mantener la cadena trófica). Una densidad muy alta de estrellas masivas, las progenitoras de los GRB, impide que la vida pueda evolucionar tanto en las galaxias pequeñas como el centro de las grandes galaxias. Por otro lado, en las regiones muy externas de una galaxia como la nuestra no hay GRB, pero tampoco planetas. Un entorno galáctico como el de nuestro sistema solar parece proporcionar el único equilibrio posible: hay bastantes estrellas para producir los elementos pesados a partir de los cuales se forman los planetas sólidos, pero no demasiadas. Esto podría explicar la paradoja de Fermi y por qué las civilizaciones inteligentes no abundan tanto como cabría esperar. Y, curiosamente, el valor observado de la constante cosmológica puede inferirse maximizando la probabilidad de que existan galaxias como la nuestra: de gran tamaño, pero sin peligrosas galaxias enanas a su alrededor.

Los matemáticos británicos de la Segunda Guerra Mundial consiguieron calcular correctamente la producción mensual de tanques alemanes sin más que examinar unos pocos números de serie. De igual modo, parece que podemos inferir algunas cualidades acerca del multiverso a partir del único caso que conocemos: nuestro universo. Los universos con una constante cosmológica mucho mayor o menor que la que observamos no parecen ser aptos para la vida, lo que hace pensar que nuestro cosmos tal vez sea como el grano de café que mencionábamos al principio. Y, volviendo al símil del número de líneas de autobús, saber que vivimos en el «universo número 27» nos indica que no puede haber muchos universos en los que la vida compleja sea posible. IyC

PARA SABER MÁS

Did a gamma-ray burst initiate the late Ordovician mass extinction? Adrian Melott et al. en *International Journal of Astrobiology*, vol. 3, n.º 1, págs. 55-61, enero de 2004.
Possible role of gamma ray bursts on life extinction in the universe. Tsvi Piran y Raúl Jiménez en *Physical Review Letters*, vol. 113, art. 231102, diciembre de 2014.
Cosmic explosions, life in the universe, and the cosmological constant. Tsvi Piran et al. en *Physical Review Letters*, vol. 116, art 081301, febrero de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

El universo inflacionario autorregenerante. Andrei Linde en *IyC*, enero de 1995.
¿Dónde están? Ian Crawford en *IyC*, septiembre de 2000.
Las explosiones más brillantes del universo. Neil Gehrels, Luigi Piro y Peter J. T. Leonard en *IyC*, febrero de 2003.
Buscando vida en el multiverso. Alejandro Jenkins y Gilad Pérez en *IyC*, marzo de 2010.
(In)trascendencia cósmica. Caleb Scharf en *IyC*, marzo de 2015.



VIDA EXTRATERRESTRE

EL FIN DE LA MEDIOCRIDAD COPERNICANA

El significado cósmico de nuestra especie a la luz de la astrofísica moderna

Howard A. Smith



¿SOMOS COMUNES? Esta sucesión de planetas similares a la Tierra representa la multiplicidad de caminos que pudo haber tomado la vida en el cosmos hasta tornarse inteligente. En el pasado, la ciencia ha apoyado la idea de que la especie humana no era más que un producto azaroso de la evolución. Varios avances recientes en astrofísica y cosmología han comenzado a cuestionar nuestra supuesta mediocridad.

EN SÍNTESIS

La ciencia moderna ha supuesto tradicionalmente que tanto los planetas similares a la Tierra como la vida inteligente deberían ser comunes en el universo. Esta premisa se conoce como «principio de mediocridad copernicana».

Dos hallazgos recientes invitan a cuestionar dicho supuesto: la enorme variedad de exoplanetas que existen, y el hecho de que las constantes de la naturaleza parecen estar cuidadosamente ajustadas para permitir la existencia de vida.

La Tierra y la humanidad parecen ser especiales a todos los efectos prácticos, al menos por cuanto seremos capaces de saber durante miles de años. Ello aporta un nuevo elemento ético al debate sobre la conservación de nuestro planeta.

Howard A. Smith es astrofísico sénior en el Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard y profesor en el Departamento de Astronomía de dicha universidad. Con anterioridad fue catedrático en el Museo Smithsoniano Nacional del Aire y el Espacio, así como científico de la NASA.



La noción de que la Tierra no ocupa el centro del cosmos es una conclusión que debemos al modelo de universo concebido en el siglo XVI por Nicolás Copérnico. Por esa razón, la inferencia de que somos cósmicamente ordinarios recibe en ocasiones el nombre de «principio de mediocridad copernicana». Carl Sagan, el célebre astrofísico y divulgador, lo expresó con las siguientes palabras: «Vivimos en un insignificante planeta de una triste estrella perdida en una galaxia encajada en una esquina olvidada del universo».

Al igual que Copérnico, la ciencia moderna ha revolucionado nuestra comprensión del cosmos y, por regla general, sus descubrimientos se han empleado para reafirmar la mediocridad copernicana. Los éxitos de numerosas disciplinas, desde la cosmología hasta la genómica, han infundido en muchos científicos la arrogancia suficiente para alardear de nuestra nimiedad. «Somos tan insignificantes que no puedo creer que todo el universo exista en nuestro beneficio», ha asegurado Stephen Hawking. Esta creencia no es rara y, a menudo, deriva de una cosmovisión que ya presupone tal intrascendencia. Una consecuencia adicional, ya evidente en la teoría de la selección natural de Darwin, es que la humanidad constituye un producto de la evolución carente de propósito.

Sin embargo, deberíamos ser cautos ante tales suposiciones, especialmente en un contexto en el que la ciencia del siglo XXI, desde la física hasta la biología, está expandiendo nuestra comprensión del mundo. La noción de mediocridad podría resultar tan falaz como la antigua idea de superioridad. Incluso el paradigma histórico según el cual Copérnico sacó a la Tierra de su pedestal es engañoso. Como ha señalado el historiador Dennis R. Danielson, de la Universidad de la Columbia Británica, Copérnico y sus coetáneos no creían que el modelo heliocéntrico condenase a la humanidad a la insignificancia. Al contrario: la prevalencia de los puntos de vista griegos y cristianos de la época mantenía que la Tierra se situaba, en palabras del filósofo italiano del siglo XV Giovanni Pico, «en las partes excrementarias y sucias del mundo inferior», donde residían los seres imperfectos y mortales. Al situar el Sol en el centro, Copérnico elevó a la humanidad hacia un lugar más cercano a los cielos. Solo en la era posnewtoniana pasó el centro a ser visto como un lugar preeminente, con lo que el sistema heliocéntrico parecía degradar la Tierra a la mediocridad.

No obstante, dos avances extraordinarios y recientes en astronomía (el descubrimiento de planetas en torno a otras estrellas y el desarrollo de la cosmología inflacionaria) sugieren que, después de todo, puede que no seamos tan ordinarios. Tal vez haya llegado el momento de reexaminar nuestra supuesta mediocridad y, si en verdad fuésemos especiales en algún sentido, considerar los desafíos éticos que ello implica a la hora de preservar nuestro planeta.

PLANETA FÉRTIL, UNIVERSO HOSTIL

Hicieron falta unos 4000 millones años para que la vida inteligente emergiese en la Tierra. No conocemos todas las condiciones que favorecieron que la inteligencia prosperase, pero sí sabemos que nuestro planeta es único en el sistema solar, por lo que no deberíamos dar por garantizado su hospitalario entorno. Con todo, el cosmos es extraordinariamente vasto y alberga una enorme diversidad de mundos, cuyas propiedades y capacidad para engendrar vida ya hemos comenzado a estudiar. Si realmente somos ordinarios, la vida inteligente tendría que haber surgido con relativa frecuencia en otros mundos. Pero, tal y como señalara en 1950 el físico italiano Enrico Fermi, si las civilizaciones extraterrestres son tan comunes en el universo, ¿dónde están?

En esta reflexión solo cabe considerar la vida dotada de pensamiento consciente, independiente y con facultad para comunicarse a través de las estrellas. Si toda la vida alienígena se reduce a bacterias, queda fuera de toda duda que no somos mediocres en absoluto. El descubrimiento de formas de vida primitivas en otras partes del universo nos ayudaría a reconstruir la evolución de la inteligencia en la Tierra. Pero, a menos que una especie pueda comunicarse con nosotros, seguiremos siendo únicos y estando solos, sin nadie a quien enseñar o de quien aprender, nadie que pueda ayudarnos a resolver nuestros problemas o —en las fantásticas extrapolaciones del cine— nadie contra quien luchar.

Para estimar el número de posibles civilizaciones extraterrestres, los científicos han tratado de identificar los distintos pasos responsables de que la vida emerja, evolucione y madure hasta la inteligencia; después, han asignado a cada uno de ellos una probabilidad. Este cálculo queda resumido en la célebre ecuación de Drake, así llamada en honor al astrónomo estadounidense Frank Drake. Dicha ecuación se emplea para evaluar, a partir de diferentes supuestos, el número de posibles civilizaciones en la Vía Láctea con las que algún día podríamos quizá contactar.

Los avances recientes en detección de exoplanetas afectan a un término clave de dicha ecuación: la fracción de mundos capaces de albergar vida inteligente. Desde los antiguos griegos, los filósofos naturales han supuesto que tanto los planetas como la vida serían algo habitual en el cosmos. El astrónomo Percival Lowell, famoso por haber defendido la existencia de canales artificiales en Marte, escribió en su obra de 1908 *Mars as the abode of life*: «De todo lo que hemos aprendido sobre su constitución, por un lado, o de su distribución, por el otro, sabemos que la vida supone una fase de la evolución planetaria tan inevitable como el cuarzo, el feldespato o el suelo nitrogenado. Todos y cada uno de ellos no son sino manifestaciones de la afinidad química». Hoy en día, cualquier niño sabe que en Marte no hay ni canales ni extraterrestres. La confianza retórica de Lowell se basaba en ciertas presuposiciones sobre la vida que nadie sostendría hoy.

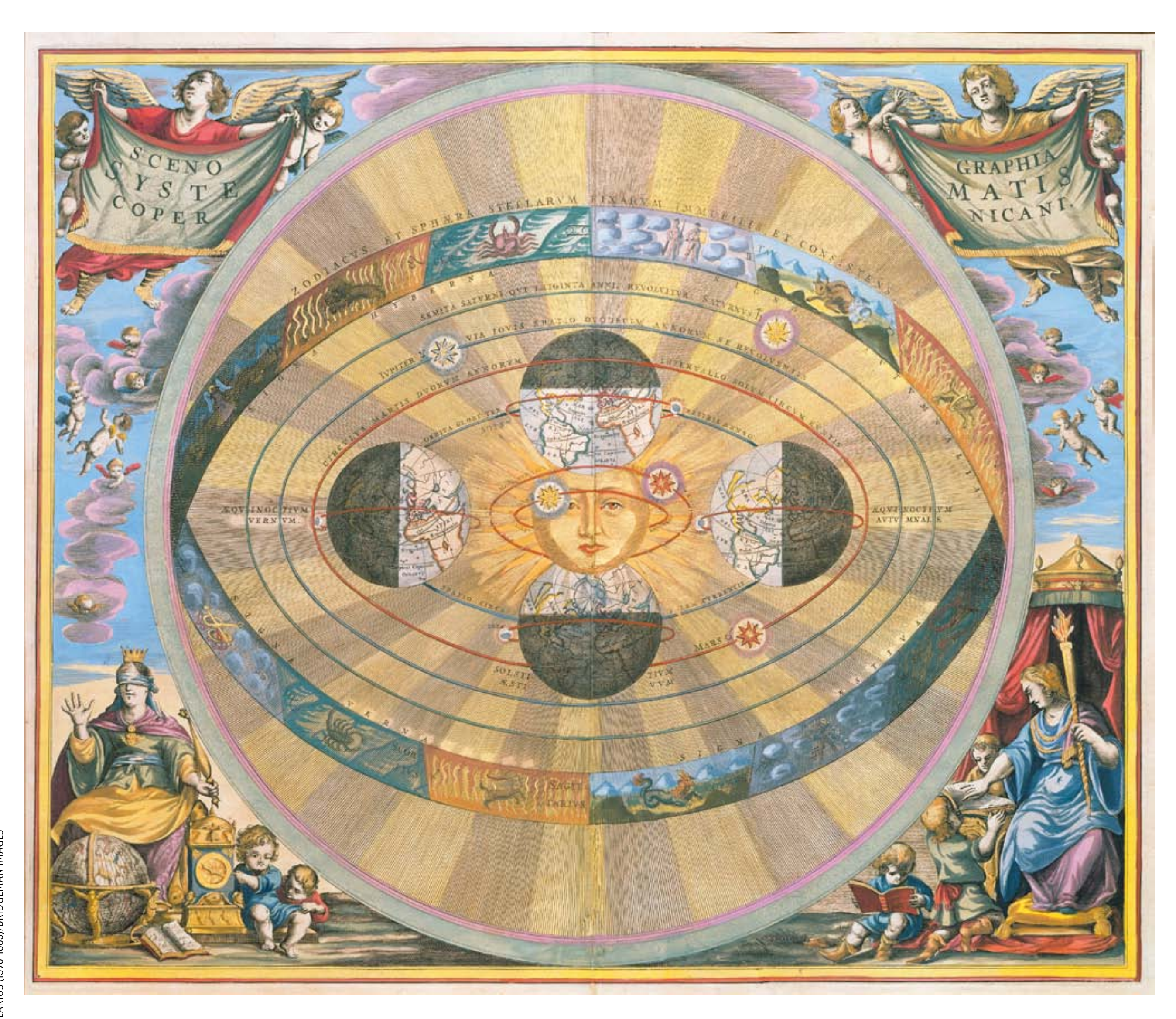
PÁGINAS ANTERIORES: NASA/ESA/G. BACON/INSTITUTO PARA LA CIENCIA DEL TELESCOPIO ESPACIAL

A pesar de ello, se han formulado otras hipótesis optimistas. Hace tan solo unas décadas, los libros de texto enseñaban que prácticamente todas las estrellas de masa moderada alojaban sistemas planetarios similares al nuestro y con un mundo de tipo terrestre capaz de albergar especies inteligentes. Como señalaron los astrónomos Donald Goldsmith y Tobias Owen en su libro de texto de 1993 *The search for life in the universe*: «Nada en nuestras teorías sobre el origen y la evolución de nuestro Sol resulta exclusivo del sistema solar. [...] Parece haber una alta probabilidad de que uno de esos planetas interiores orbite en torno a su estrella a la distancia adecuada [para albergar vida]. Uno de cada dos nos parece una estimación conservadora».

Hasta el momento se han detectado más de 3600 exoplanetas. Tan solo la misión Kepler, lanzada por la NASA en 2009, ha identificado más de 2300. De muchos de ellos se ha logrado medir su masa, radio y otras propiedades. El Satélite de Inspección de Exoplanetas en Tránsito (TESS, por sus iniciales en inglés), de la NASA, cuya puesta en órbita se prevé para 2018, encontrará muchos más. Lo más emocionante no es que existan exoplanetas, sino lo variados que son.

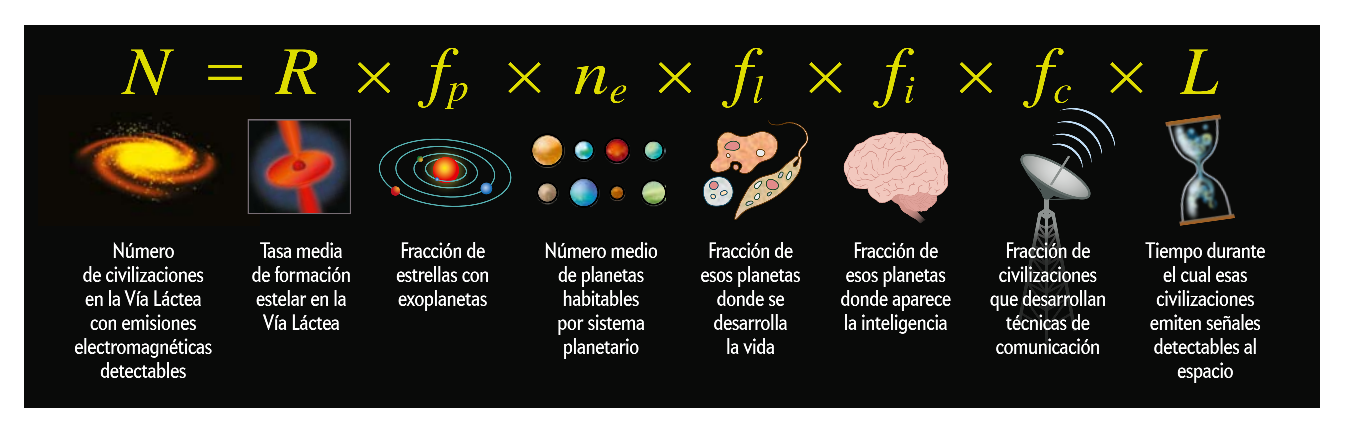
A la hora de evaluar si un planeta podría sustentar vida, suele considerarse la presencia de agua líquida. Ello implica que el planeta debe orbitar en torno a su estrella dentro de lo que se conoce como «zona habitable»; es decir, a una distancia del astro tal que la superficie del planeta presente una temperatura intermedia, ni demasiado caliente ni demasiado fría. Hoy conocemos decenas de exoplanetas en sus respectivas franjas de habitabilidad. Al extrapolar la estadística de los mundos descubiertos hasta ahora, los astrónomos han concluido que, al menos para algunas clases de estrellas, es probable que exista un exoplaneta en su zona habitable.

Cinco exoplanetas detectados hace poco (Próxima b, TRAPPIST-1e, TRAPPIST-1f, TRAPPIST-1g y LHS 1140b) orbitan en torno a estrellas enanas (menores y más tenues que el Sol) y presentan temperaturas que podrían permitir la existencia de agua líquida en su superficie. Sin embargo, exhiben también serias limitaciones para soportar vida. Debido a la menor temperatura de



ANDREAS CELLARIUS (1596-1665)/BRIDGEMAN IMAGES

HELIOCENTRISMO Y MEDIOCRIDAD: El modelo heliocéntrico sacó a la Tierra del centro del sistema solar. Más tarde, ello impulsó la interpretación de que la Tierra no es más que un planeta común y que, como consecuencia, los mundos similares a ella deberían abundar en el universo.



ECUACIÓN DE DRAKE: Formulada en 1961 por el astrofísico Frank Drake, esta ecuación se emplea para estimar, bajo diferentes supuestos, el número de civilizaciones detectables en la Vía Láctea. El reciente hallazgo de miles de exoplanetas está ayudando a afinar el valor de los términos asociados al número de mundos potencialmente habitables. Con todo, las mayores incertidumbres son las relativas a los parámetros biológicos.

estas estrellas, su zona habitable se encuentra mucho más cerca de ellas que en el caso del Sol. Un planeta que orbite tan próximo a su estrella tendrá uno de sus lados permanentemente orientado hacia esta (un efecto conocido como «bloqueo gravitacional», o «acoplamiento de marea»), por lo que una mitad estará siempre iluminada y la otra sumida en la oscuridad. Además, esta clase de estrellas frías y pequeñas, denominadas enanas de tipo M, poseen una circulación interior casi enteramente convectiva, por lo que transportan gas caliente a la superficie desde el interior profundo. El Sol, por el contrario, solo desarrolla corrientes de convección en sus capas superficiales. El tipo de circulación de las enanas de tipo M genera intensas fulguraciones coronales, rayos X y vientos estelares, lo que podría poner en peligro la vida en cualquier planeta situado en la zona «habitable». Próxima b, el exoplaneta descubierto en 2016 en torno Próxima Centauri, la estrella más cercana al Sol, tiene un período orbital de 11,2 días. Se halla lo suficientemente próximo al astro como para estar en su zona habitable, pero esa misma cercanía lo deja expuesto a las llamaradas y a la radiación de la estrella, las cuales bien podrían haber eliminado cualquier océano o atmósfera.

El requisito de la zona habitable es solo uno de los muchos necesarios para que un exoplaneta pueda alojar vida inteligente. En *Rare Earth: Why complex life is uncommon in the universe*, el paleontólogo Peter D. Ward y el astrónomo Donald Brownlee explican por qué incluso las formas de vida sencillas requieren mucho más que agua líquida para existir. Se necesitan también los ingredientes adecuados; sin embargo, los elementos químicos no se hallan distribuidos de manera uniforme en el universo. Asimismo, resulta esencial un entorno que se mantenga estable durante miles de millones de años. La idoneidad para la vida se ve también afectada por otros factores, como la excentricidad orbital (la relación entre la mayor y la menor distancia entre el planeta y la estrella). Este parámetro determina las variaciones anuales en la iluminación, así como la sensibilidad de un planeta a las perturbaciones gravitatorias ejercidas por otros con órbitas próximas. Con una excentricidad de aproximadamente 0,017, la órbita de la Tierra resulta casi circular. Solo el 5,3 por ciento de los exoplanetas listados actualmente en la Enciclopedia de Planetas Extrasolares, una base de datos en línea desarrollada por un consorcio internacional de instituciones astrofísicas, exhibe una excentricidad orbital menor o igual que la de la Tierra.

Los resultados obtenidos hasta ahora revelan la existencia de una enorme variedad de sistemas y entornos, a menudo extraños y mucho más diversos de lo que nadie había imaginado. Como escribiera Sara Seager, planetóloga del Instituto de Tecnología de Massachusetts, en uno de sus libros publicados en 2010: «Parece que menos del 10 o el 20 por ciento de las estrellas similares al Sol podrían albergar copias del sistema solar. En cambio, los astrónomos han descubierto que los sistemas exoplanetarios son increíblemente variados, con planetas de casi todas las masas y tamaños imaginables, así como separaciones orbitales de su estrella anfitriona». A menudo, los científicos y los periodistas describen los nuevos exoplanetas como potencialmente habitables. Pero nos encontramos en una etapa muy primitiva de estos estudios, y tales aseveraciones solo indican que el planeta se halla en la zona habitable y que probablemente presente una composición rocosa. En la próxima década, con la llegada del telescopio espacial James Webb, de la NASA, y otros grandes instrumentos terrestres, los investigadores esperan poder estudiar mejor las atmósferas que quizá rodean a algunos de estos mundos, cuya química podría revelar potencial para la vida.

Hasta ahora nos hemos centrado en un solo término de la ecuación de Drake: el relativo a los exoplanetas. Sin embargo, los términos más inciertos no son los astronómicos, sino los tres biológicos: la probabilidad de que la vida se desarrolle en un planeta adecuado; de que evolucione hasta desarrollar inteligencia, y de que sobreviva durante el tiempo suficiente. La emergencia de organismos, incluso en un ambiente perfecto de laboratorio, así como su evolución, constituye el objeto de una vasta y compleja bibliografía. Otra gran pregunta es si una civilización puede mantenerse como tal durante largo tiempo. Aquí tal vez baste observar que los genetistas han concluido que la evolución del ADN en la Tierra fue tortuosa y probablemente incluyó numerosos episodios fortuitos. El biólogo evolutivo Stephen Jay Gould, de Harvard, argumentó que la evolución misma, al menos en la Tierra, siguió un camino muy improbable, en el que la aparición de grandes cerebros no estaba garantizada en absoluto. Aunque los mismos procesos físicos operen en todas partes, ciertas cadenas de acontecimientos, incluidos los biológicos, podrían ser astronómicamente menos probables que otras. La evolución de la inteligencia podría ser una de ellas.

COMUNICARSE CON ALIENÍGENAS

No importa que los extraterrestres prosperen en los rincones remotos del universo: lo fundamental es que conozcamos su existencia. Dado que la mayor parte de nuestra galaxia, por no

AMERICAN SCIENTIST MAGAZINE

hablar de otras, se encuentra demasiado lejos para poder fotografiar artefactos u obtener otras pruebas directas de actividad inteligente, el mejor método consiste en buscar señales de radio. Mientras no las detectemos, solo estaremos conjeturando la existencia de civilizaciones alienígenas.

Para centrar la discusión y facilitar los análisis cuantitativos, consideremos el volumen de espacio que podremos explorar en cien generaciones, un intervalo de tiempo que a efectos prácticos es «para siempre». Esta es, por supuesto, una escala temporal arbitraria. Si atendemos a un volumen menor, como el accesible en una sola generación, obtendríamos una respuesta (afirmativa o negativa) cien veces más rápido, pero las posibilidades de encontrar civilizaciones extraterrestres se verían reducidas en un millón (ello se debe a que el número de estrellas que podemos investigar resulta proporcional al volumen del espacio correspondiente, el cual varía como el cubo de la distancia, o del tiempo). Una generación equivale a unos 25 años. Dado que para comunicarnos con otra civilización necesitaríamos al menos una ronda de mensajes de ida y vuelta, cien generaciones equivalen a explorar una distancia de unos 1250 años luz desde la Tierra. En esta región del espacio existen unos 30 millones de estrellas de todo tipo. Si las probabilidades de que la inteligencia se desarrolle en un planeta fueran de uno entre 30 millones, posiblemente estaríamos solos en este vecindario cósmico.

El programa de Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre (SETI), impulsado por Drake, ha adoptado la posición de Jill Tarter, titular de la Cátedra Bernard M. Oliver de Investigación en SETI, quien en 1983 escribió en *Science* que «el único test significativo de la existencia de inteligencia extraterrestre ha de ser experimental». Pero la enorme limitación que impone la velocidad finita de la luz implica que, aunque hubiera una red de civilizaciones avanzadas al otro lado de la Vía Láctea, jamás podríamos comunicarnos con ellas en escalas temporales humanas. Además, cualquier señal que no apuntase hacia nosotros probablemente nunca sería detectada.

Cuando comenzó el programa SETI, hace más de 50 años, la tecnología no bastaba para detectar un planeta gemelo de la Tierra a 1250 años luz de distancia. Hoy, sin embargo, los medios han mejorado. Según se afirma, SETI podría identificar una civilización en cualquiera de las mil estrellas más cercanas si transmitiera hacia nosotros señales tan débiles como las del radar de un avión. Hasta ahora no hemos observado nada, pero en menos de cien generaciones podremos extraer algunas conclusiones estadísticamente significativas sobre los resultados, nulos o no.

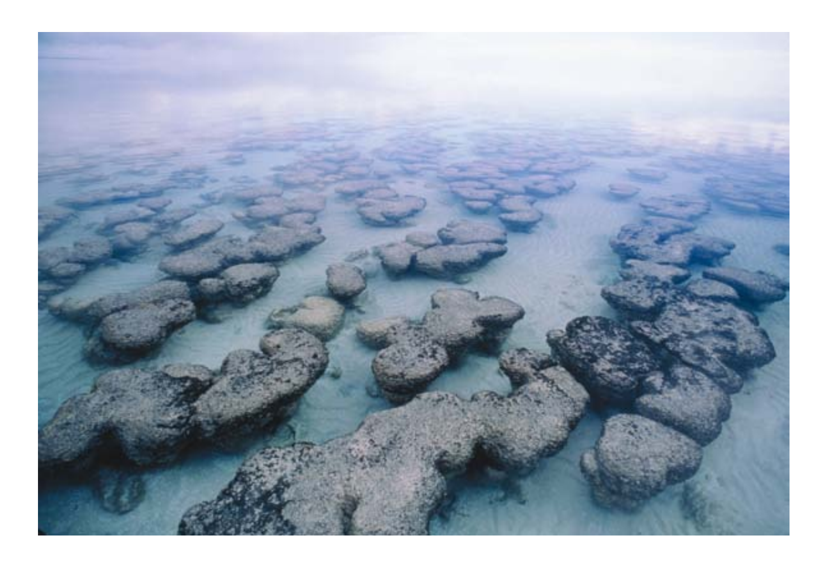
Aunque la Vía Láctea tuviese millones de planetas similares a la Tierra y con agua, y aunque la aparición de vida fuera inevitable en cada uno de ellos, los argumentos anteriores sugieren que es muy probable que vayamos a vivir en soledad durante al menos cien generaciones. Por supuesto, podemos ampliar el volumen de nuestra búsqueda para aumentar las posibilidades de encontrar inteligencia extraterrestre, pero entonces tendremos que esperar aún más tiempo. El «principio misantrópico» expresa la idea de que los múltiples entornos posibles en el cosmos son tan cambiantes y poco cooperativos —o incluso hostiles—, ya sea siempre o en momentos concretos del largo período de gestación y maduración que aparentemente requiere el desarrollo de la inteligencia, que es improbable que la vida inteligente evolucione y prospere. Por tanto, puede que la vida no sea algo corriente. Podríamos estar aislados y verdaderamente solos en el universo.

AJUSTE FINO CÓSMICO

Al pensar acerca de nuestra supuesta mediocridad, con su connotación de ser no solo estadísticamente promedio, sino también insignificantes, hay un segundo principio que debemos contemplar. Este se basa en el hecho de que las constantes físicas fundamentales parecen estar extraordinariamente ajustadas para facilitar la aparición de la vida inteligente. Aunque lo anterior se refiere a cualquier tipo de inteligencia, y no solo a la humana, esta observación suele conocerse con el nombre de «principio antrópico».

Vivimos en un planeta que orbita en la zona habitable de su estrella y que posee otras muchas características acogedoras: desde una composición química favorable hasta placas tectónicas. Ningún otro lugar del sistema solar se asemeja remotamente a la Tierra. Pero el universo es vasto: tan solo nuestra galaxia contiene cientos de miles de millones de estrellas. Tal vez un paraíso como la Tierra pueda surgir de manera aleatoria en alguna parte del universo. Desde este punto de vista, no es que hayamos tenido suerte: simplemente estamos donde podíamos estar.

Con todo, si las constantes fundamentales del universo (constantes como las intensidades de las cuatro interacciones elementales de la naturaleza, entre otras) tomasen valores muy diferentes de los que toman, no estaríamos aquí. El ejemplo más extremo de ajuste fino nos lo proporciona la historia de expansión del universo. Se estima que, si el equilibrio entre los distintos efectos cósmicos variase en una sola parte en 10^{120}, no existiríamos en absoluto (si bien no hay un acuerdo unánime sobre hasta qué punto se encuentran ajustadas las constantes; Fred Adams, de la Universidad de Michigan, ha calculado algunos escenarios mucho menos restrictivos.) Los orígenes del principio antrópico se remontan a hace décadas, cuando el físico Paul Dirac llamó la atención sobre el curioso equilibrio que



JOHN READER/SCIENCE SOURCE

VIDA PRIMITIVA: Las estructuras de estromatolitos de la bahía de Shark, en Australia, han aportado indicios sobre las formas de vida más antiguas de nuestro planeta. Una de las condiciones implícitas en la ecuación de Drake impone que, una vez que la vida emerge, un planeta debe mantenerse estable durante el tiempo suficiente para que la inteligencia pueda evolucionar.

parecían respetar los grandes números cósmicos. Un universo tan bien ajustado para sustentar vida inteligente constituye el segundo indicio de que nuestra mediocridad copernicana podría haber llegado a su fin.

¿Por qué el universo parece hallarse tan exquisitamente afinado para sustentar vida inteligente? Por un lado, podría no ser más que pura suerte. Por otro, y como postulan algunos teóricos, tal vez exista un multiverso: un número infinito de universos que abarcarían todas las posibilidades lógicas. De ocurrir así, no nos quedaría más remedio que existir en uno de esos universos en los que la vida inteligente es posible [*véase* «Explosiones cósmicas, la vida y el multiverso», por Raúl Jiménez, *en este mismo número*]. Se trataría de un argumento similar al que atañe a los planetas, según el cual la Tierra no sería más que uno de los pocos mundos en los que podíamos prosperar.

Hay una tercera respuesta, la cual atañe a la filosofía y a la mecánica cuántica, y que resulta mucho más incierta, polémica y provocadora. La interpretación tradicional de la mecánica cuántica describe la materia en términos de funciones de onda, objetos matemáticos probabilísticos que solo se convierten en entidades reales cuando son medidos por un observador. El fallecido John Wheeler, uno de los grandes expertos en la teoría cuántica, defendió la noción de que el universo tenía que producir seres conscientes para tornarse real. Esta idea, a veces llamada el «principio antrópico participativo», aún puede encontrarse en los textos modernos.

Argumentar que somos afortunados puede parecer lavarse las manos. Y, como físico entrenado para dar preferencia a soluciones sencillas, considero demasiado exótica la explicación basada en el multiverso. El argumento que invoca a la mecánica cuántica se revela misterioso y desasosegante, pero la teoría cuántica encierra también otros misterios, por lo que, de las tres respuestas posibles, es la que ofrece un potencial mayor.

No obstante, el problema básico sigue resultando muy perturbador, sobre todo si partimos de una cosmovisión reduccionista que presupone nuestra insignificancia. Es perturbador porque sugiere que algo guía el universo hacia la inteligencia, y que los humanos seríamos representantes de ese extremo teleológico. Si fuésemos los únicos seres inteligentes que existen —o los únicos de los que tendremos noticias hasta dentro de milenios—, entonces seríamos algo más que simplemente mediocres. Seríamos especiales. En el siglo xxi, nuestra perspectiva difiere de manera notable de la que tenían Copérnico y sus coetáneos del siglo xvi. Podemos apreciar la inmensidad del espacio y el tiempo, las complejidades de la genética y la evolución y el significado de la estadística. Por más que la Tierra no se encuentre en el centro del universo, su exuberante entorno podría convertirla en un oasis singular. Así que tal vez podamos apreciar que la humanidad podría ser inusual, incluso especial



¿VERDADERAMENTE HABITABLES? Recreación artística de la superficie de TRAPPIST-1f, uno de los siete mundos similares a la Tierra descubiertos en 2017 en torno a la estrella enana ultrafría TRAPPIST-1. Aunque el planeta se encuentra en la zona habitable de su estrella y, por tanto, podría contener agua líquida, la cercanía de dicha franja al astro implica que este mundo quedaría muy expuesto a las fulguraciones y la radiación de la estrella. Tales condiciones podrían comprometer la viabilidad de las posibles formas de vida.

NASA/LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO (JPL)/CALTECH

y no mediocre, al menos por cuanto seremos capaces de averiguar durante largo tiempo.

EL FIN DE LA MEDIOCRIDAD COPERNICANA

El principio misantrópico plantea dilemas epistemológicos y éticos. La cuestión epistemológica es simple: no haber detectado ninguna inteligencia extraterrestre no significa que esta no exista en algún lugar. Pero, hasta que obtengamos una señal clara proveniente de muy lejos, o hasta que la ciencia nos proporcione algún argumento concluyente, permaneceremos ignorantes sobre los supuestos alienígenas.

El segundo dilema es ético: la Tierra se encuentra bajo presión y la humanidad se enfrenta a la miseria. Han hecho falta 13.800 millones de años de historia cósmica para desarrollar la rica biosfera que disfrutamos y que en ocasiones damos por garantizada. Si nuestro mundo es solo una colección evolucionada de átomos, entonces tal vez su salud y bienestar futuros no supongan una gran preocupación: en un cosmos que bulle con vida, es posible que algunas civilizaciones alienígenas sobrevivan aunque la Tierra no lo haga. Pero, si la especie humana es singular, hemos de enfrentarnos a la idea de que ni la Tierra ni nosotros mismos seamos producto de un accidente común. Esta conclusión añade urgencia a la causa de la protección de nuestro planeta y sus valiosos habitantes.



¿HAY ALGUIEN AHÍ? Desde el norte de California, la Batería de Telescopios Allen explora los cielos en busca de signos de inteligencia extraterrestre. Aunque la tecnología actual permitiría detectar casi cualquier señal de radio proveniente de alguna de las mil estrellas más cercanas a nosotros, hasta ahora todos los esfuerzos han resultado vanos.

CORTESÍA DE SETH SHOSTAK/INSTITUTO SETI

Cuando las ideas de Copérnico arraigaron y el mundo entendió que el universo no era geocéntrico, la gente comenzó a pensar en el mundo, en la humanidad y en su propio ser bajo una nueva luz. A partir de los rápidos avances de la ciencia posterior a Newton, concluimos que, dado que la Tierra parecía ser ordinaria, también lo sería la humanidad. Hoy, las pruebas científicas que cuestionan la mediocridad copernicana deberían iniciar un proceso similar de autorreevaluación. Parecemos inusuales, aunque es poco probable que sepamos cuánto durante muy largo tiempo. Puede que seamos solo un accidente, pero la vida consciente parece constituir un logro notable e imprevisto del universo, con atributos no predecibles para un simple conjunto de átomos. El principio antrópico, al menos en algunas interpretaciones, indica que algún rasgo necesario de la naturaleza dotó al cosmos de semejante facultad, haciéndola fundamental para la gran explosión y guiándola durante eones de evolución hasta producir seres conscientes. Somos representantes de ese punto final teleológico.

En 2010, al escribir sobre el impacto que ha ejercido el descubrimiento de exoplanetas, Seager y el astrónomo Jack J. Lissauer, de la misión Kepler, afirmaron: «Completaremos por fin la revolución copernicana. [...] Nos encontramos al borde, si no en el mismo centro, del mayor cambio de perspectiva sobre nuestro lugar en el universo desde el tiempo de Copérnico». Tal vez resulte cierto. Pero, si se considera honestamente, parece mucho más probable que ese cambio de perspectiva se dé en la dirección opuesta: hacia la recuperación de nuestro estatus excepcional.

Estos argumentos a favor del final de la mediocridad se basan necesariamente en datos incompletos, en una estadística precaria y en el reconocimiento de que aún nos queda mucho por aprender. Puede que debamos esperar milenios sumidos en la ignorancia hasta disponer de sondeos estelares más completos que nos indiquen si es probable o no que existan otras civilizaciones. Aun así, mientras aguardamos la llegada de más información sobre civilizaciones extraterrestres o sobre la física cuántica, deberíamos reconocer que la historia es sutil, y que disponemos de indicios convincentes que apuntan a que la humanidad es preciosa. Aunque la Tierra no sea única en sentido estricto, sí parece ser, a todos los efectos prácticos, un lugar especial. La implicación del principio antrópico es que puede que ello sea relevante. La implicación del principio misantrópico es que habremos de cuidar de nuestro planeta y de nuestra especie por nosotros mismos, sin la ayuda de ideas o de tecnología extraterrestre. Esta reevaluación se debe a la ciencia moderna, pero abordarla demandará lo mejor de nuestras facultades humanas.

PARA SABER MÁS

The anthropic cosmological principle. John D. Barrow y Frank J. Tipler. Oxford University Press, 1988.

Rare Earth: Why complex life is uncommon in the universe. Peter D. Ward y Donald Brownlee. Springer Verlag, 2000.

Introduction to exoplanets. Sara Seager y Jack J. Lissauer en *Exoplanets*, dirigido por Sara Seager, págs. 3-13. University of Arizona Press, 2010.

Alone in the universe. Howard A. Smith en *Zygon*, vol. 51, págs. 497-519, mayo de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

La vida en el universo. Steven Weinberg en *IyC*, diciembre de 1994.

¿Dónde están? Ian Crawford en *IyC*, septiembre de 2000.

El amanecer de los exoplanetas. Michael D. Lemonick en *IyC*, septiembre de 2013.

El caso contra Copérnico. Dennnis Danielson y Christopher M. Graney en *IyC*, diciembre de 2014.

(In)trascendencia cósmica. Caleb Scharf en *IyC*, marzo de 2015.

El origen astroquímico de los sistemas planetarios y la vida. Rafael Bachiller en *IyC*, abril de 2015.

NEUROCIENCIA

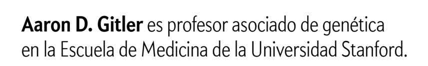
GENÉTICA DE LA ESCLEROSIS LATERAL AMIOTRÓFICA

Recientes descubrimientos sobre mutaciones ligadas a la enfermedad están ayudando a desvelar cómo esta destruye las neuronas motoras y arrebata la movilidad al enfermo. Los avances podrían abrir la puerta a nuevos fármacos contra un trastorno que hoy carece de tratamiento

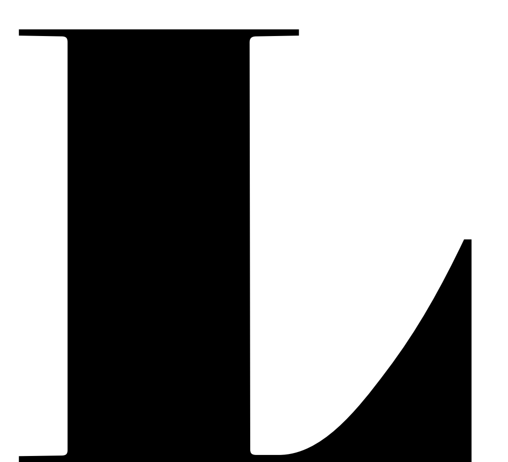
Leonard Petrucelli y Aaron D. Gitler



Leonard Petrucelli es profesor y jefe del Departamento de Neurociencia de la Clínica Mayo en Jacksonville, Florida.



Aaron D. Gitler es profesor asociado de genética en la Escuela de Medicina de la Universidad Stanford.



La esclerosis lateral amiotrófica (ELA) golpea sin avisar. La afección, que despoja a las neuronas de su facultad para interaccionar con los músculos, comienza sin dolor y con síntomas sutiles (tropiezos, torpeza o problemas de dicción) que a menudo pasan desapercibidos. La enfermedad atraía escasa atención pública hasta que el legendario primera base de los Yankees Lou Gehrig comenzó a dejar caer pelotas y a desmayarse en el campo sin razón aparente. Célebre por jugar 2130 partidos consecutivos durante 14 años, a Gehrig se le diagnosticó la ELA en junio de 1939 y recibió una emotiva despedida en el estadio de su equipo apenas un mes después. La pérdida del control muscular avanzó con tal rapidez que en diciembre ya no pudo asistir a su ceremonia de ingreso en el Salón Nacional de la Fama del Béisbol. La parálisis progresiva acabó dejándolo postrado en cama. Moriría en junio de 1941 a los 37 años.

Cada año se diagnostican más de 6000 casos nuevos de ELA en Estados Unidos, país donde se la conoce como la enfermedad de Lou Gehrig. En general afecta a personas de 50 a 60 años, pero puede surgir mucho antes o incluso alrededor de los 80. Al principio, ciertas células del encéfalo y de la médula espinal llamadas motoneuronas comienzan a morir. Puesto que estas mandan señales del encéfalo a los músculos a través de la médula espinal, su muerte deteriora la movilidad, la destreza, el habla e incluso dificulta la deglución. Las funciones superiores del cerebro casi siempre permanecen intactas: las personas aquejadas de ELA están condenadas a presenciar el deterioro implacable de su cuerpo. Pronto se ven postradas en una silla de ruedas y, luego, en cama. Sin capacidad para comunicarse, comer o respirar por sí mismas, la mayoría muere de fallo respiratorio en el plazo de tres a cinco años. El único fármaco aprobado por la Administración de Alimentos y Medicamentos de EE.UU. (FDA) es el bloqueador de glutamato riluzol, que prolonga la vida una media de tres meses. No existe cura.

El neurólogo francés Jean-Martin Charcot, descubridor de la enfermedad en 1869, la nombró con pleno acierto: «amiotrófica» significa ausencia de alimentación muscular; «lateral» se refiere al área de la médula espinal en la que se localizan partes de las motoneuronas que mueren; y «esclerosis» es el endurecimiento o la cicatrización que ocurre a medida que la degeneración neuronal avanza. A pesar de esta clara descripción, cerca de un siglo y medio después, la complejidad de la ELA continúa desconcertando. Aunque siempre resulta mortal, cerca de un 10 por ciento de los afectados sobrevive más de diez años por razones desconocidas, algunos incluso más. El célebre físico Stephen Hawking forma parte de esa minoría, pues ha vivido con ELA durante más de cinco décadas. Las investigaciones sugieren que los factores ambientales desempeñan un papel mínimo en la aparición de la ELA, probablemente al agudizar la vulnerabilidad de los individuos genéticamente predispuestos. Lo más desconcertante es que el trastorno aparece básicamente al azar. Menos del 10 por ciento de los casos surgen por rasgos genéticos transmitidos de una generación a otra en el seno de una familia. El resto se clasifican como no hereditarios, o esporádicos.

Durante la pasada década, complejas técnicas de secuenciación han propiciado un salto de gigante en nuestro conocimiento de las bases biológicas del trastorno. Estudios en curso indican que son numerosos los genes que aumentan la vulnerabilidad a padecerlo, ya sea actuando en solitario o en concierto. Ciertas mutaciones se han vinculado con casi el 70 por ciento de los casos familiares y con alrededor del 10 por ciento de los esporádicos. A su vez, esta abundancia de nuevos datos genéticos está abriendo vías terapéuticas prometedoras. El silenciamiento de genes podría ser un tratamiento apto para algunas formas de ELA: estaba previsto que dos fármacos cuya diana son genes defectuosos entrasen en la fase de ensayos clínicos este año. Mientras tanto, se

EN SÍNTESIS

La esclerosis lateral amiotrófica (ELA), un trastorno neurodegenerativo, ataca las neuronas que desde el encéfalo inervan la musculatura de todo el cuerpo a través de la médula espinal.

Complejas técnicas de secuenciación genética han propiciado un frenesí de descubrimientos que revelan las bases genéticas de la ELA. Todo indica que la predisposición a sufrir la enfermedad obedece a cambios o mutaciones en numerosos genes.

El silenciamiento genético mediante oligonucleótidos antisentido se ha erigido en un tratamiento potencial contra algunos tipos de ELA. De igual modo, se pretende cuantificar la enfermedad a medida que progresa para facilitar su detección precoz y el desarrollo de nuevas terapias farmacológicas.

PÁGINAS ANTERIORES: JEREMY WILSON

NUEVOS TRATAMIENTOS

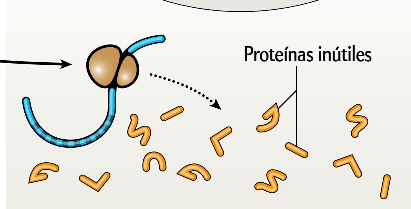
Un gen anómalo desenmascarado

Estudios recientes han revelado que el exceso de «letras» en una secuencia de ADN del cromosoma 9 es la causa de la mayoría de los casos heredados y de algunos casos esporádicos de ELA. Mientras los investigadores descifran el misterio de cómo estas mutaciones causan la enfermedad, los desarrolladores de fármacos están probando unas moléculas sintéticas, los oligonucleótidos antisentido (OAS), para silenciarlas.

Se introducen OAS por inyección espinal.

Evitar que la mutación cause el problema

Un OAS diseñado para penetrar en la célula y buscar el ARN transcrito del gen *C9ORF72* mutante señaliza ese ARN para que sea destruido por una de las enzimas celulares. Ensayos inminentes probarán este método mediante la infusión de la molécula sintética en el sistema nervioso de los pacientes de ELA que tienen la mutación *C9ORF72* a través de una inyección intratecal, una especie de punción lumbar a la inversa.



Tres resultados problemáticos

Las mutaciones aparecen en el gen *C9ORF72*. El ARN mensajero defectuoso transcrito a partir de su ADN puede dañar las motoneuronas de tres maneras, viajando hacia y desde los ribosomas de la célula, donde se traduce en proteínas.

Mutación (número de repeticiones mayor del usual)

Gen *C9ORF72*

ADN

ARN

Ribosoma

Proteína producida

Variantes de ARN mal plegadas

Proteínas inútiles

ESCENARIO 1: El exceso de repeticiones reduce las copias de ARN disponibles para transcribir, con lo que la síntesis de la proteína codificada por *C9ORF72* disminuye, y esta pierde su función normal, aún desconocida.

ESCENARIO 2: EL ARN con repeticiones adicionales se transcribe a partir de las dos hebras del ADN, «sentido» y «antisentido», dando lugar a moléculas de ARN mal plegadas que crean una maraña de ARN y de proteínas.

ESCENARIO 3: En lugar de codificar la proteína normal, las repeticiones excesivas presentes en el ARN se traducen en un surtido de proteínas tóxicas e inútiles que dañarían las motoneuronas del encéfalo y la médula espinal.

JEN CHRISTIANSEN

están descubriendo biomarcadores característicos, como sustancias detectables en los líquidos corporales o rasgos de la actividad eléctrica del cerebro, que podrían facilitar el diagnóstico precoz y acotar mejor la evolución de la enfermedad. También podrían ser útiles para el desarrollo de otros medicamentos.

PRIMERAS PISTAS GENÉTICAS

Las personas con ELA familiar —la mayoría con una probabilidad del 50 por ciento de transmitir el trastorno a su descendencia— constituyen una pequeña parte de los enfermos de ELA, pero han desempeñado un papel fundamental en el desciframiento de las bases genéticas de la enfermedad. La primera conexión llegó en 1993, con el descubrimiento de una mutación en el gen *SOD1* en cerca del 20 por ciento de los casos de ELA familiar. *SOD1* codifica la enzima antioxidante superóxido dismutasa, que convierte la altamente reactiva molécula de superóxido (un radical libre de oxígeno) en formas menos dañinas. En un principio se planteó la hipótesis de que la mutación de *SOD1* podría debilitar la capacidad antioxidante de la enzima y permitiría que los radicales libres de oxígeno causaran estragos en las motoneuronas. Un cuarto de siglo después, sabemos que no es así. Más bien parece que esa mutación desencadena lo que llaman una ganancia de función tóxica, en la que la enzima hace algo más de lo que se supone que hace en condiciones normales.

En concreto, la nueva función provoca cambios en la forma de ciertas proteínas de las neuronas. La mayoría de las autopsias practicadas a enfermos de ELA presentan un punto en común en cuanto a la histopatología del tejido nervioso: aglomeraciones de proteínas en el seno de las motoneuronas. Para operar correctamente, los componentes proteicos del interior celular deben ser reciclados; con la ELA, el sistema de reciclaje se desbarata. Todas las proteínas, también las enzimas, deben adoptar una conformación tridimensional precisa a medida que son sintetizadas en la célula para funcionar debidamente; las mutaciones parecían causar plegamientos anómalos que provocaban la agregación. Las células señalan esas proteínas deformes con ubiquitina, un marcador molecular que indica que deben ser eliminadas. Cuando este sistema se satura, los desechos se acumulan. En los afectados por ciertos tipos de ELA familiar, las motoneuronas aparecen plagadas de cúmulos de proteínas *SOD1* aberrantes, marcadas con ubiquitina.

Un descubrimiento fundamental sobrevino en 2006, a raíz del estudio de casos de ELA sin mutaciones en *SOD1*. En la práctica totalidad de ellos se constató que otra proteína, TDP-43, también se acumulaba en las motoneuronas. TDP-43 pertenece a una clase de proteínas que regulan la actividad de los ARN mensajeros, copias móviles del ADN que sirven de molde para sintetizar las proteínas. TDP-43 se une a un ARN mensajero, guía su proce-

samiento en el núcleo, lo transporta adonde necesite ir dentro de la célula y realiza otras funciones importantes para «traducir» el ARN a una proteína. De alguna manera, en la ELA, la TDP-43 sale del núcleo y comienza a acumularse en el citoplasma. Incluso actúa como una especie de imán que atrae otras copias de sí misma hacia el citoplasma. Aún resta por determinar si sufre una pérdida de función (porque es expulsada del núcleo) o si adquiere una función tóxica (porque se acumula en el citoplasma), o ambas cosas.

La identificación de TDP-43 como proteína de aglomeración fundamental en la mayoría de los casos de ELA ayudó a los genetistas a dar con el gen que la codifica, *TARDBP*, y hallar mutaciones poco frecuentes en las familias con variantes hereditarias de la enfermedad. El principal punto de inflexión fue el descubrimiento de que las alteraciones de una proteína de unión al ARN podían causar la ELA. Posteriormente se hallaron otros genes causantes del trastorno que dan lugar a proteínas implicadas en la regulación del ARN y todo hace pensar que puede haber más. A finales de los años 2000 se vivió una explosión de descubrimientos genéticos sobre la ELA, con la aparición de uno o dos nuevos genes cada año. Pero lo más apasionante estaba por venir.



LOS VÍDEOS del reto del cubo de agua helada por la ELA filmados por millones de personas, como el piloto de fórmula 1 Daniel Ricciardo, fomentaron la concienciación y la financiación para la investigación.

EL ADN SE REPITE CON FRENESÍ

Los descubrimientos surgieron del estudio de varias familias afectadas por una forma hereditaria de ELA. En 2011, dos equipos dieron a conocer de manera independiente una mutación peculiar en un gen de nombre igualmente peculiar: *C9ORF72*, de «marco abierto de lectura (o región codificante de proteínas) número 72 del cromosoma 9» en inglés. En las personas sanas, el gen contiene una secuencia corta (GGGGCC) que se repite de 2 a 23 veces. En las portadoras de la mutación *C9ORF72*, el segmento se repite cientos y, a veces, miles de veces.

Investigaciones ulteriores revelaron que ese exceso de repeticiones podía explicar del 40 al 50 por ciento de los casos de ELA familiar y del 5 al 10 por ciento de los casos supuestamente esporádicos. La sorpresa surgió cuando el hallazgo de las mutaciones reveló una conexión entre la ELA y otra enfermedad, una forma de demencia conocida como degeneración frontotemporal (DFT), que se caracteriza por cambios en la personalidad y en la toma de decisiones. Mutaciones de *C9ORF72* pueden causar la ELA o la DFT, o incluso una combinación de ambas llamada ELA-DFT. Además, en las personas con mutaciones en *C9ORF72* se acumula la omnipresente proteína TDP-43, hecho que vincula de nuevo ambos trastornos. De esta relación se deduce que la ELA y la DFT podrían formar parte de un abanico de enfermedades afines, aunque no está claro cómo las mutaciones en el mismo gen provocan síntomas tan dispares.

Se están investigando tres mecanismos celulares que podrían explicar de qué modo las mutaciones de ese misterioso gen causan la ELA. El segmento de ADN repetido podría interferir con el modo en que el código genético se transcribe en ARN mensajero, que, a su vez, se traduce en la proteína C9ORF72, lo que reduciría la cantidad de proteína sintetizada. Esta reducción podría disminuir los efectos de la proteína, cuya función se desconoce. Una alternativa sería la ganancia de función tóxica: quizá la secuencia repetida haga que el ARN se aglomere en el núcleo neuronal y actúe como un imán, atrapando proteínas de unión al ARN que dejan de cumplir su labor. O podría haber una ganancia de función tóxica por un giro inesperado de la biología molecular, en el que la expansión de la secuencia repetida se traduciría en pequeñas proteínas aberrantes propensas a la agregación en las neuronas de las personas cuyo gen *C9ORF72* está mutado.

Por ahora, los datos apuntan a que las mutaciones de *C9ORF72* causan la ELA por una ganancia de función tóxica, si bien la contribución relativa de las aglomeraciones de ARN y de proteínas no queda clara. En última instancia, la distinción podría ser irrelevante, pues las estrategias terapéuticas que se están desarrollando detendrían la producción del ARN y de la proteína del gen mutante a la par.

FÁRMACOS CONTRA LAS REPETICIONES

El silenciamiento de genes a través de moléculas sintéticas llamadas oligonucleótidos antisentido (OAS) supone uno de los avances terapéuticos más apasionantes en el campo de las enfermedades neurodegenerativas. Los OAS se diseñan para reconocer y fijarse a la molécula de ARN mensajero producida por un gen concreto, unión que desencadena la rápida actuación de una enzima que ataca el híbrido de ARN-OAS. Los OAS propician así la destrucción selectiva de casi cualquier ARN producido por un gen mutante. En el caso del *C9ORF72*, los estudios en roedores indican que las moléculas antisentido diseñadas para destruir las aglomeraciones de ARN en las motoneuronas acaban con los cúmulos de proteínas aberrantes con repeticiones e impiden la formación de nuevas acumulaciones de esa naturaleza.

Los fármacos antisentido concebidos para actuar contra el gen mutante *C9ORF72* deberían entrar en la fase de ensayos clínicos en humanos el próximo año. Entretanto, también se ha diseñado un agente antisentido para las formas familiares de ELA causadas por *SOD1*; los resultados de un ensayo clínico preliminar indican que es seguro inyectarlo en el espacio lleno de líquido de la columna vertebral, lugar elegido para que el fármaco viaje a través del líquido cefalorraquídeo que baña el encéfalo y halle su camino hasta las motoneuronas.

El éxito de un OAS concebido contra otro trastorno neurodegenerativo, la atrofia muscular espinal, da motivos para ser prudentemente optimistas. Este trastorno genético de las motoneuronas que afecta a lactantes es parecido a la ELA. Muy pocos de los afectados viven más allá de su tercer cumpleaños. En dos ensayos clínicos recientes con un fármaco antisentido que persigue corregir un defecto en un gen productor de un ARN mensajero anormal, los bebés con atrofia muscular espinal mostraron tal mejoría en sus capacidades motoras que la FDA aceleró la revisión de ambos ensayos y aprobó el fármaco a finales de diciembre de 2016.

ESCLARECIENDO LA ELA ESPORÁDICA

El estudio de ciertas formas minoritarias con un claro patrón de herencia familiar ha allanado el camino para esclarecer las bases biológicas de la enfermedad. El mayor reto estriba en hallar las mutaciones que predisponen a padecer ELA esporádica. En todo el mundo se suceden las iniciativas para obtener muestras

de ADN de enfermos con ELA y escudriñar su genoma con el fin de recabar datos.

Para acelerar esa tarea, los genetistas han ideado un microchip destinado a los estudios de asociación del genoma completo (GWAS, por sus siglas en inglés), que compara ágilmente el genoma de las personas con ELA con el de personas sanas. El chip se centra en regiones provistas de polimorfismos de un solo nucleótido, puntos donde una letra del código del ADN (o nucleótido) puede variar de una persona a otra. Los GWAS solo establecen correlaciones y no revelan la causa de la ELA, pero detectan discrepancias que merecen un examen más atento. Varias iniciativas internacionales en las que se han practicado GWAS a más de 10.000 personas con ELA y más de 20.000 personas sanas han desvelado una serie de diferencias genéticas que se están investigando. La recolección de datos se ha simplificado gracias a nuevas técnicas que han hecho posible secuenciar el genoma de un individuo en un solo día por menos de 1000 dólares. Secuenciar únicamente el exoma, la parte que codifica las proteínas, requiere aún menos tiempo y dinero.

Cuando se haya compilado el catálogo completo de las variantes genéticas asociadas con la predisposición a la ELA, se intentará descifrar la manera en que las mutaciones relacionadas con la enfermedad aumentan el riesgo de contraerla. Ello implicará estudiar las interacciones entre genes y dilucidar si en ciertas formas de ELA concurren varios genes mutantes, así como si los factores ambientales contribuyen a desatarla en algunas personas. Estudios recientes apuntan incluso a que la ELA podría sobrevenir en parte por el despertar de un retrovirus latente, una secuencia de ADN vírico que se insertó mucho tiempo atrás en el genoma y que en condiciones normales habría permanecido en silencio. Pudiera ser que ese retrovirus reactivado saltara de una neurona a otra y causara los daños que desencadenan el trastorno.

NUEVAS DIRECCIONES ESPERANZADORAS

Cada vez más investigaciones sugieren que la ELA es más que una simple enfermedad de las motoneuronas. Las células gliales, más abundantes en el encéfalo que las propias neuronas, también podrían participar. Dichas células desempeñan diversos cometidos: algunas dan soporte físico a las neuronas, otras regulan el medio interno del encéfalo, sobre todo el líquido que baña las neuronas y sus sinapsis. Estudios recientes en ratones portadores de la mutación del gen *SOD1* dieron una sorpresa. La anulación de la síntesis del gen mutante en las células gliales prolongó la vida a pesar de la presencia permanente de la proteína SOD1 tóxica en las motoneuronas del roedor. Parece que la ELA puede originarse en las motoneuronas, pero la comunicación con las células gliales facilita su progresión. La glía contribuiría igualmente con la producción de un factor tóxico, si bien no hay certeza sobre cuál sería ni cómo actuaría. Cuando el factor (o factores) sea identificado, se podrán idear métodos para bloquear su producción o dificultar su capacidad para transmitir la señal perniciosa a las motoneuronas con el fin de frenar la ELA.

En medio de la cruzada por desentrañar el sinfín de causas de la ELA, los investigadores también porfían por descubrir biomarcadores que ayuden a los médicos a valorar el avance de la enfermedad. Por ejemplo, estudios en curso intentan detectar la repetición anormal de proteínas provocada por la expansión del ADN de *C9ORF72* en líquidos corporales de fácil acceso, como la sangre o el líquido espinal. El pasado marzo, uno de nosotros (Petrucelli) publicó que había detectado esas proteínas en el líquido cefalorraquídeo de personas con ELA y con ELA-DFT, así como en pacientes asintomáticos portadores del gen mutado. Ello podría facilitar el diagnóstico precoz. Otra investigación de biomarcadores pretende diseñar técnicas de imagen que detecten los agregados de TDP-43 en el encéfalo de las personas con ELA antes de que comiencen a destruir las motoneuronas. Todos esos biomarcadores también servirían de puntos de referencia para juzgar el éxito de posibles terapias en los ensayos clínicos.

Los rápidos avances que se suceden en la genética y la genómica, así como la aparición de nuevos y mejores biomarcadores, darán paso a la era de la medicina de precisión para la ELA. En un futuro cercano, el paciente será clasificado en virtud del tipo de ELA que padece y recibirá una profilaxis o un tratamiento personalizado.

EL PODER DE LAS REDES SOCIALES

Gran parte del progreso en el estudio de la ELA durante la pasada década se puede atribuir a la buena voluntad de un gran número de enfermos que brindan su tiempo y su ADN para los estudios genómicos a gran escala. Gracias al poder de las redes sociales, los afectados y sus familias han contribuido a mejorar la concienciación y a recaudar fondos para la investigación y los servicios asistenciales para los pacientes.

«El reto del cubo de agua helada por la ELA» revolucionó Internet en 2014. Pete Frates, antiguo capitán de béisbol del Boston College diagnosticado de ELA dos años antes, a los 27 años, ayudó a ponerlo en marcha cuando subió un vídeo en Facebook en el que retaba a sus amigos a verter un cubo de agua helada sobre su propia cabeza para recaudar dinero destinado a la Asociación de ELA. La campaña se convirtió en viral cuando celebridades invitadas, como Mark Zuckerberg, Bill Gates, Oprah Winfrey, Leonardo DiCaprio y LeBron James aceptaron el reto. A lo largo de ocho semanas, los usuarios de Facebook subieron más de 17 millones de vídeos empapándose por la causa. La recaudación ascendió a más de 115 millones de dólares, de los que el 67 por ciento se destinaron a la investigación, el 20 por ciento a los servicios para los pacientes y la comunidad, y el 9 por ciento a la educación pública y profesional.

La ELA es cruel e implacable. Antes del conmovedor discurso de Gehrig en el estadio de los Yankees y de que la noticia de su diagnóstico se extendiera, la mayoría de los enfermos sufría en silencio. Pero ahora la conciencia pública no cesa de crecer, en parte gracias a gente como Frates. La campaña que ayudó a promover revitalizó la Asociación de ELA, que desde entonces ha triplicado su presupuesto anual para investigación. Impera el optimismo desatado por la explosión de conocimientos en torno a la biología de la ELA. Pocos dudan de que, de seguir así, pronto saldrán a la luz nuevos genes defectuosos y nuevos tratamientos para mantener a raya este sigiloso mal. IyC

PARA SABER MÁS

State of play in amyotrophic lateral sclerosis genetics. Alan E. Renton, Adriano Chiò y Bryan J. Traynor en *Nature Neuroscience*, vol. 17, n.º 1, págs. 17-23, enero de 2014.

Decoding ALS: From genes to mechanism. J. Paul Taylor, Robert H. Brown, Jr., y Don W. Cleveland en *Nature*, vol. 539, págs. 197-206, 10 de noviembre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Esclerosis lateral amiotrófica. Josep E. Esquerda en *MyC* n.º 17, 2006.

Combatir la esclerosis lateral amiotrófica. Patrick Aebischer y Ann C. Kato en *IyC*, enero de 2008.

FÍSICA DE PARTÍCULAS

El enigma de los neutrinos

El mayor experimento jamás diseñado para estudiar estas misteriosas partículas podría revelar qué hay más allá del modelo estándar

Clara Moskowitz



Clara Moskowitz es redactora de *Scientific American*. Cursó estudios de física y astronomía en la Universidad Wesleyan y cuenta con un título de posgrado en periodismo científico de la Universidad de California en Santa Cruz.



VOY ANDANDO POR UNA PASARELA EN UNA GIGANTESCA CAVERNA LLENA DE EQUIPOS industriales. Me explican que billones de neutrinos atraviesan mi cuerpo cada segundo. Extiendo los brazos, aunque por supuesto no siento absolutamente nada. Sin apenas masa y a una velocidad casi igual a la de la luz, estas partículas fantasmales atraviesan el espacio vacío entre mis átomos sin dejar rastro. La gran mayoría de ellos cruza del mismo modo la enorme caja metálica que domina la caverna. Pero, unas cuantas veces al día, un neutrino colisiona contra alguno de los átomos de este artilugio del tamaño de un autobús escolar. Al hacerlo, libera partículas con carga eléctrica que dejan trazas detectables. Los físicos confían en que esos datos les lleven a un territorio inexplorado.

El aparato forma parte del experimento NOvA (de NuMI Off-Axis Electron Neutrino Appearance; la «v» significa «neutrino», por su similitud con la letra griega ν, símbolo para los neutrinos en física de partículas), del Laboratorio Nacional de Aceleradores Fermi (Fermilab), en Batavia, Illinois. En Minnesota se encuentra enterrado un detector similar, aunque de mayor tamaño. Su objetivo consiste en capturar neutrinos que, tras pasar por el primer aparato, hayan atravesado los 800 kilómetros de roca que separan ambas instalaciones.

Operativo desde 2014, NOvA es el experimento de neutrinos más largo del mundo. Sin embargo, es también el predecesor de uno mucho mayor: el Experimento de Neutrinos del Subsuelo Profundo (DUNE, por sus siglas en inglés). Este comenzará en Fermilab, donde un haz de protones colisionará contra un blanco de grafito y generará neutrinos. Después, estos viajarán 1300 kilómetros bajo tierra desde Illinois a Dakota del Sur. Los 500 kilómetros adicionales servirán para aumentar la probabilidad de que las peculiares propiedades de estas partículas acaben manifestándose.

DUNE es el experimento de física de altas energías más ambicioso que se haya intentado construir en suelo estadounidense desde el fracasado Supercolisionador Superconductor (SSC), en los años noventa del pasado siglo. El proyecto, que costará 1500 millones de dólares, debería comenzar a tomar datos en la década de 2020 y se espera que permanezca operativo durante al menos veinte años. Con unos mil investigadores de 30 países, se convertirá también en el mayor experimento de neutrinos del mundo. Asimismo, será la primera vez que el principal laboratorio de física de partículas de Europa, el CERN, invierta en un proyecto fuera del continente. Y, al igual que en 2012 el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) descubrió el bosón de Higgs, los científicos confían en que DUNE les permita entender el universo a un nivel más profundo. «Queremos hacer con los neutrinos lo que el LHC hizo con el higgs», explica Mark Thomson, físico de Cambridge y coportavoz de DUNE. «Creemos que estamos a punto de iniciar la siguiente gran revolución en física de partículas.»

La razón de que los neutrinos levanten tantas expectativas se debe a que se trata de las primeras partículas que no parecen ajustarse del todo al modelo estándar, la teoría que describe la materia y sus interacciones básicas a un nivel fundamental. Según ella, los neutrinos deberían carecer de masa. Sin embargo, hace ya más de 15 años que dos experimentos, uno en Japón y otro en Canadá, descubrieron que estas partículas poseen una masa diminuta. Pero lo interesante es que no parecen adquirirla de la misma manera que el resto de las partículas, por lo que su

EN SÍNTESIS

De todas las partículas elementales conocidas, los neutrinos probablemente sean las más misteriosas. Aunque durante décadas se pensó que carecían de masa, hoy sabemos que no es así. El origen de su masa, sin embargo, sigue siendo un enigma.

Un ambicioso proyecto aún en construcción, el Experimento de Neutrinos del Subsuelo Profundo (DUNE), en EE.UU., enviará haces de neutrinos de Illinois a Dakota del Sur, a 1300 kilómetros de distancia.

DUNE estudiará el curioso fenómeno por el que estas partículas mutan espontáneamente de identidad. Con ello, los físicos esperan dilucidar el origen de su masa y otros fenómenos, como la asimetría entre materia y antimateria en el universo.

PÁGINA ANTERIOR: MARK ROSS STUDIOS

origen podría deberse a nuevos fenómenos físicos: una partícula, interacción o mecanismo aún por descubrir.

En los últimos años, debido a la falta de resultados en otros frentes, el estudio de los neutrinos se ha consolidado como una de las líneas de investigación más prometedoras en física de partículas. Por ahora, el LHC no ha encontrado nada que no estuviese predicho por el modelo estándar; al mismo tiempo, los experimentos diseñados para detectar las partículas que constituyen la materia oscura siguen con las manos vacías. «Sabemos que el modelo estándar no está completo. Hay algo más allá, pero ignoramos qué», explica Stephen Parke, físico de neutrinos del Fermilab. «Hay quien ha apostado su carrera al LHC; otros nos hemos decidido por los neutrinos.»

UN MISTERIO DE PESO

El día después de mi visita a la caverna de NOvA llego a una oficina vacía en el tercer piso del Robert Rathbun Wilson Hall, el edificio principal del Fermilab. Parke, acompañado del físico teórico André de Gouvêa, de la Universidad Noroccidental de EE.UU., me explica que ha escogido esta oficina para nuestro encuentro porque, en su día, fue la de Leon Lederman, antiguo director del Fermilab y padre de una técnica para generar haces de neutrinos usando aceleradores. Aquel trabajo sentaría más tarde los cimientos de DUNE y, en 1962, permitiría descubrir una de las tres especies de neutrino, lo que en 1988 le valdría a Lederman el Nobel de física. Parke y De Gouvêa reconocen que, aunque la física de neutrinos ha avanzado mucho desde entonces, los científicos siguen perplejos. «Lo interesante de los neutrinos es que, cuanto más aprendemos sobre ellos, más preguntas nos surgen», puntualiza Parke. «Son partículas malvadas.»

Parke, original de Nueva Zelanda, quedó fascinado por los neutrinos poco después de llegar a EE.UU. en los años setenta para cursar su doctorado. En las décadas siguientes, los neutrinos perdieron su reputación de aburridas partículas sin masa. «Hemos vivido una revolución tras otra», afirma Parke. «La cuestión es: ¿queda alguna pendiente?» Él y De Gouvêa apuestan que sí. «Solo ahora hemos empezado a medir las propiedades de los neutrinos a un nivel equiparable al del resto de las partículas», indica De Gouvêa. Y apostilla: «No conocemos sus masas, podría haber nuevos tipos de neutrinos y podrían interaccionar con otras partículas que no lo hacen con nada más».

DUNE se centrará en estudiar la extraña tendencia de los neutrinos a cambiar de identidad, un proceso conocido como «oscilación». Existen tres especies, o «sabores», de neutrino: el electrónico, el muónico y el tauónico. Se distinguen porque, al interaccionar con los átomos de un detector, generan partículas de tipos diferentes: los neutrinos electrónicos dan lugar a electrones, mientras que los muónicos y los tauónicos producen, respectivamente, muones y tauones (partículas similares al electrón pero más masivas). Lo sorprendente es que los neutrinos de un tipo pueden transformarse espontáneamente en neutrinos de otro. Un neutrino muónico producido en Fermilab puede llegar a Dakota del Sur convertido en uno electrónico o tauónico. Hasta ahora, se trata de las únicas partículas elementales conocidas que sufren semejante metamorfosis.

Cuando hace más de 15 años se observó este comportamiento, el hallazgo sirvió para resolver un antiguo misterio. En los años sesenta, los científicos comenzaron a estudiar los neutrinos que llegaban a la Tierra procedentes del Sol. Sin embargo, solo detectaban un tercio de los que predecía la teoría. Años más tarde, las oscilaciones explicaron el fenómeno: los dos tercios que faltaban eran neutrinos electrónicos que, en su camino a la Tierra, se habían convertido en muónicos o tauónicos. Y estos últimos escapaban a los experimentos, que únicamente eran capaces de detectar neutrinos electrónicos. Pero, aunque aquel descubrimiento acabó con el llamado «problema de los neutrinos solares», puso sobre la mesa otro: según las leyes cuánticas, los neutrinos solo pueden cambiar de tipo si tienen masa. Y eso era precisamente lo que no predecía el modelo estándar.

El hecho de que los neutrinos oscilen se debe a que cada sabor corresponde a una superposición cuántica de tres «estados de masa». Por tanto, un neutrino de un sabor determinado nunca tiene una masa bien definida, sino que queda descrito por una combinación de las tres masas posibles. Cuando viajan por el espacio, las componentes asociadas a cada uno de los tres estados de masa avanzan a velocidades ligeramente distintas. Con el tiempo, ese desajuste genera cambios en la mezcla de estados de masa que caracterizan el neutrino. De esta manera, un neutrino muónico (definido por una combinación específica de masas) puede acabar convertido en uno electrónico o tauónico.

Los científicos aún ignoran los valores exactos de las masas asociadas a cada estado; por el momento, solo saben que son diferentes y distintas de cero. Al contar cuántos neutrinos oscilan en su viaje entre Illinois y Dakota del Sur, DUNE pretenderá determinar la relación entre las diferentes masas. La teoría indica que estas podrían ordenarse de forma que dos sean muy pequeñas y una grande, o bien de modo que dos sean grandes y una pequeña. La primera posibilidad recibe el nombre de «jerarquía normal»; la segunda se conoce como «jerarquía invertida». DUNE debería ser capaz de distinguir entre ambas opciones, ya que la materia que habrán de atravesar los neutrinos a lo largo de su camino debería de afectar a las oscilaciones. Si la jerarquía normal resultase ser la correcta, a la llegada se observaría una relación de sabores distinta de la que tendría lugar con una jerarquía invertida. «Enviar neutrinos a través de la materia nos permite determinar esa diferencia con facilidad. Cuanto más distancia recorran los neutrinos, más clara será la señal», indica Thomson. Y concluye: «Este es un problema físico que DUNE resolverá con toda seguridad en pocos años».

EL ORIGEN DE LA MASA

Una vez conocida la jerarquía de masas de los neutrinos, los investigadores esperan poder abordar un problema más importante: cómo adquieren su masa estas partículas. La masa de la mayoría de las partículas, como los electrones o los quarks, se debe a su interacción con el campo de Higgs, el cual impregna todo el espacio y se encuentra asociado al bosón de Higgs. Sin embargo, el mecanismo de Higgs solamente funciona con partículas que presenten tanto una versión «levógira» como una «dextrógira», una propiedad básica relacionada con la orientación relativa del espín y del sentido de movimiento. El problema reside en que, hasta ahora, solo se han detectado neutrinos levógiros. Si el origen de su masa fuera el mecanismo de Higgs, también deberían existir neutrinos dextrógiros.

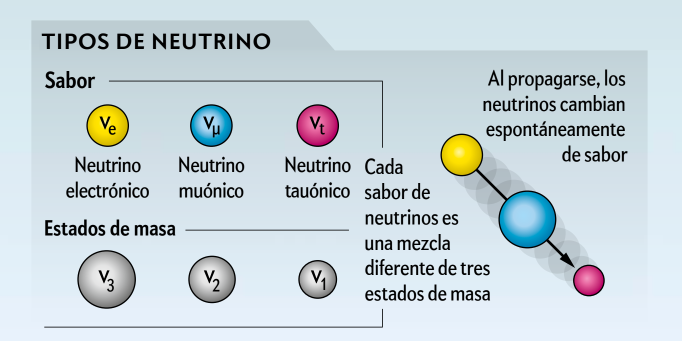
El hecho de que no se hayan detectado neutrinos dextrógiros indica que, si existen, no interaccionan con las demás partículas conocidas, una posibilidad que los físicos consideran poco probable. Además, si el mecanismo de Higgs actuase también sobre los neutrinos, lo natural sería que sus masas fueran similares a las del resto de las partículas conocidas. Sin embargo, los

Partículas desconcertantes

Los neutrinos son partículas de masa ínfima que atraviesan la materia a velocidades cercanas a la de la luz. Existen tres tipos, o «sabores». Cuando se propagan, los neutrinos de un sabor se transforman espontáneamente en neutrinos de otro, un proceso conocido como «oscilación». Ese comportamiento es el que se propone estudiar el Experimento de Neutrinos del Subsuelo Profundo (DUNE), el más ambicioso hasta la fecha y cuya entrada en funcionamiento está prevista para la década de 2020. En él, haces de neutrinos generados en el Fermilab, en Illinois, viajarán a través de 1300 kilómetros de roca hasta el Centro de Investigación Subterráneo Sanford, en Dakota del Sur. Al llegar, se medirán las oscilaciones ocurridas durante el viaje.

SABORES Y MASAS

Los tres tipos de neutrino, electrónico, muónico y tauónico, hacen referencia a las partículas con las que interaccionan: electrones, muones y partículas tau. Contrariamente a lo que se pensó durante décadas, los neutrinos sí poseen masa. Sin embargo, un neutrino de un sabor dado no tiene una masa bien definida, sino que corresponde a una superposición cuántica de tres «estados de masa». Por ahora, los físicos ignoran los valores precisos de cada una de las masas.



Centro de Investigación Subterráneo Sanford (Dakota del Sur)

1300 kilómetros

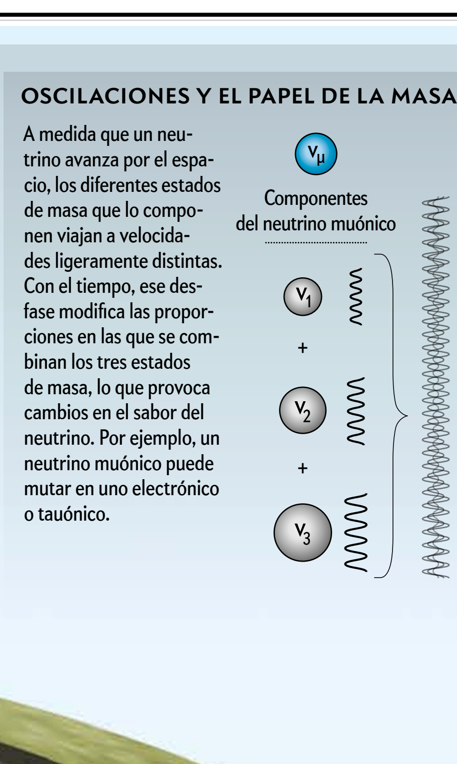
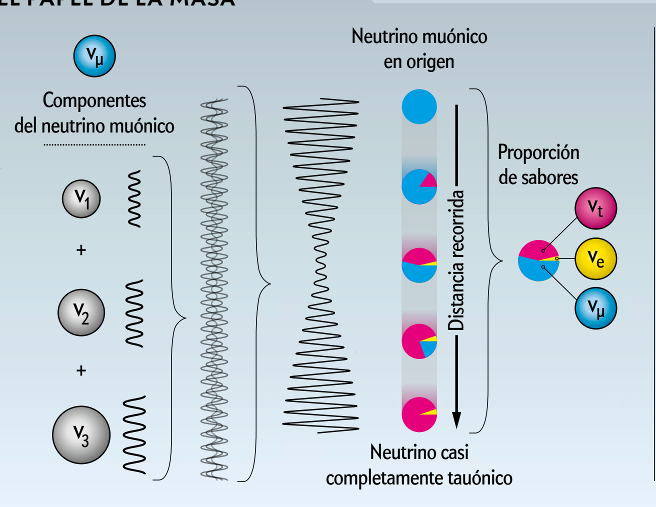
DETECTOR LEJANO

Cada uno de los cuatro módulos del detector lejano de DUNE contendrá 17.000 toneladas de argón líquido. Los físicos esperan que, cada día, entre 10 y 20 neutrinos interaccionen con los átomos de argón, lo que dejará trazas visibles en el detector.

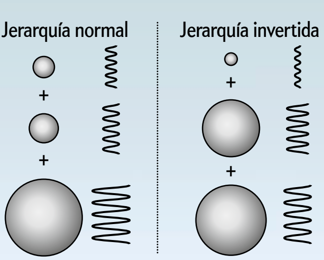
DON FOLEY (*esquema de DUNE*); JEN CHRISTIANSEN (*partículas*)

OSCILACIONES Y EL PAPEL DE LA MASA

A medida que un neutrino avanza por el espacio, los diferentes estados de masa que lo componen viajan a velocidades ligeramente distintas. Con el tiempo, ese desfase modifica las proporciones en las que se combinan los tres estados de masa, lo que provoca cambios en el sabor del neutrino. Por ejemplo, un neutrino muónico puede mutar en uno electrónico o tauónico.

Aunque no se conocen los valores precisos de las masas asociadas a los neutrinos, la teoría indica que podría haber dos ligeros y uno relativamente pesado («jerarquía normal»), o uno ligero y dos pesados (jerarquía invertida). Se espera que el experimento DUNE determine cuál es la jerarquía correcta.



UN LARGO VIAJE

DUNE enviará haces de neutrinos desde el Fermilab, en Illinois, hasta el centro de Sanford en Dakota del Sur, a 1300 kilómetros de distancia. Este recorrido, el mayor hasta el momento en un experimento terrestre de neutrinos, permitirá estudiar las oscilaciones.

Centro de Investigación Subterráneo Sanford

Fermilab

Haz de neutrinos muónicos

DETECTOR CERCANO

Se trata de una versión reducida del detector lejano. Los investigadores compararán las medidas efectuadas en ambas instalaciones para deducir cuántos neutrinos han cambiado de sabor durante el viaje.

El acelerador de partículas genera haces de neutrinos

Cuando un neutrino colisiona contra un átomo, genera partículas detectables, como electrones o fotones

Fermilab (Illinois)

Trayectoria del haz de neutrinos

Partícula con carga eléctrica



EL INYECTOR PRINCIPAL DE FERMILAB, un acelerador circular subterráneo, acelera protones para generar los haces de neutrinos que se estudiarán en el experimento DUNE.

neutrinos son extraordinariamente ligeros: aunque sus estados de masa no se conocen con exactitud, se sabe que las masas asociadas son cien mil veces menores que la del electrón, ya de por sí muy ligero. «Muy poca gente piensa que el mecanismo de Higgs sea el responsable de la masa de los neutrinos», señala Nigel Lockyer, director del Fermilab. «Lo más probable es que se trate de un mecanismo muy diferente, el cual estará asociado a otras partículas.»

Una posibilidad que los físicos contemplan con emoción es que los neutrinos sean partículas de Majorana; es decir, que sean sus propias antipartículas. Esto último es posible porque los neutrinos carecen de carga eléctrica, que es lo que distingue a una partícula de su antipartícula. Se cree que las partículas de Majorana pueden adquirir masa sin necesidad del mecanismo de Higgs, tal vez mediante la interacción con otro campo aún por descubrir. Este escenario requiere la existencia de un grupo de neutrinos de gran masa, los cuales podrían ser hasta un billón de veces más pesados que las partículas más masivas conocidas hasta la fecha. De alguna manera, ello compensaría la ínfima masa de los neutrinos ordinarios.

En física de partículas, la posibilidad de descubrir una nueva escala de energía resulta muy atractiva. «Históricamente, siempre hemos progresado explorando la naturaleza a diferentes escalas», indica De Gouvêa. Además, si hay un nuevo campo que da masa a los neutrinos, quizás este afecte también a otras partículas. «Si la naturaleza lo hace con los neutrinos, ¿con qué más puede hacerlo?», especula Lockyer. «¿Podría la materia oscura tener una masa de Majorana?»

DUNE no comprobará directamente si los neutrinos son partículas de Majorana, pero medir la jerarquía de masas ayudará a quienes ya persiguen ese objetivo en varios experimentos en Japón, Europa y otros lugares. Además, DUNE debería ayudar a dilucidar el origen de la masa de estas partículas, al aportar detalles sobre cómo evoluciona la combinación de sus estados de masa a medida que oscilan. «Queremos hacer el mejor experimento posible de oscilaciones de neutrinos, porque sabemos que es ahí donde aprenderemos sobre su masa», asegura De Gouvêa.

MATERIA CONTRA ANTIMATERIA

Por otro lado, estas diminutas partículas podrían ayudar a resolver un misterio de proporciones cósmicas: por qué el cosmos se compone de materia y no de antimateria. Los modelos teóricos predicen que, en la gran explosión que dio origen al universo, una y otra tuvieron que generarse en igual cantidad. No obstante, por alguna razón, cuando la mayor parte de la materia se aniquiló con la antimateria, quedó un pequeño exceso de la primera. A esa exigua diferencia debemos la existencia de todas las galaxias, planetas y estrellas que vemos en la actualidad.

CORTESÍA DEL DEPARTAMENTO DE ENERGÍA ESTADOUNIDENSE Y FERMILAB

Para explicar esa asimetría, los científicos buscan una partícula que no se comporte igual que su antipartícula. Varias pistas, entre las que se cuentan algunos indicios obtenidos en otros experimentos, apuntan a los neutrinos. DUNE buscará señales de la llamada «violación de CP» (carga-paridad); en otras palabras, pruebas de que neutrinos y antineutrinos oscilan de forma distinta entre los distintos sabores. Por ejemplo, DUNE podría observar que los antineutrinos muónicos se transforman en antineutrinos electrónicos a un ritmo entre la mitad y el doble de rápido de como lo hacen los correspondientes neutrinos. Parke considera que una diferencia semejante podría explicar por qué la materia prevaleció sobre la antimateria en la batalla primigenia. Curiosamente, los antineutrinos podrían oscilar de forma distinta que los neutrinos aunque fuesen partículas de Majorana. En tal caso, lo único que distinguiría a unos de otros sería su quiralidad, asociada a la orientación de su espín. Y los neutrinos, levógiros, se comportarían de manera distinta que los antineutrinos, dextrógiros.

«Lo interesante de los neutrinos es que, cuanto más aprendemos sobre ellos, más preguntas nos surgen»

—Stephen Parke, Fermilab

DUNE también podrá determinar si solo existen tres sabores de neutrinos os si, por el contario, hay más esperando a ser descubiertos. Estos neutrinos adicionales serían los conocidos como «estériles», ya que no interaccionarían en absoluto con la materia ordinaria. Algunos experimentos previos, como el Detector de Neutrinos con Líquido Centellador (LSND), en Los Álamos, o MiniBooNE, en Fermilab, obtuvieron en su día datos no concluyentes que apuntaban a que un tipo adicional de neutrino estaba interfiriendo con las oscilaciones, lo que sugirió la existencia de neutrinos estériles con masas mucho mayores que las de los neutrinos conocidos. Los investigadores confían en que DUNE confirme o descarte esta posibilidad. «Los neutrinos estériles podrían modificar significativamente el tipo de oscilaciones que observemos en DUNE», apunta Thomson.

UNA GRAN APUESTA

DUNE ha sido diseñado para tomar muchos más datos y con mucha mayor precisión que cualquier otro experimento de neutrinos. El proyecto usará un haz de neutrinos de alta energía dos veces más potente que cualquiera de los hoy existentes, y lo dirigirá a un detector más de cien veces mayor que el más vasto de su clase.

La pieza central del proyecto será el detector de Dakota del Sur, el cual se instalará en el Centro de Investigación Subterráneo Sanford. La máquina constará de cuatro módulos de detectores, cada uno del tamaño de una piscina olímpica pero seis veces más profundo, que se llenarán con 17.000 toneladas de argón líquido. Cuando un neutrino colisione contra un átomo de argón, tanto en Fermilab como en Sanford, producirá una partícula que, dependiendo del sabor del neutrino, será un electrón, un muon o una tauón. Los muones viajarán a través del argón líquido en línea recta, arrancando a su paso electrones de los átomos y dejando así una traza detectable. Si la colisión crea un electrón, el proceso dará lugar a un fotón que, a su vez, producirá más electrones y fotones, lo que generará una cascada de partículas. Los neutrinos tauónicos crearán una partícula tau, pero solo si el neutrino de partida tiene energía suficiente. Ello se debe a que la partícula tau es de mayor masa que el electrón o el muon, por lo que producirla requiere más energía. El CERN comenzará en 2018 a ensayar versiones en miniatura del detector lejano de DUNE. «Estos detectores son parecidos a una misión espacial: una vez en funcionamiento, no es posible pararlos y desmontarlos para hacer reparaciones», explica Joseph Lykken, subdirector de Fermilab. «Una vez introducidas las 17.000 toneladas de argón líquido, es simplemente demasiado complicado volver a sacarlo.»

Para poder llevarse a término, DUNE tendrá que superar los obstáculos políticos y presupuestarios que en el pasado han acabado con otros grandes proyectos en física. En julio de 2017, los científicos y las autoridades organizaron una ceremonia en las instalaciones de Sanford para celebrar el inicio de las excavaciones, que durarán al menos tres años. Pero también se efectuaron grandes trabajos de excavación para el fallido SSC, el cual iba a ser mayor incluso que el LHC y que muy probablemente hubiese descubierto el bosón de Higgs. Sin embargo, el proyecto fue cancelado en 1993 debido a los sobrecostes y a cambios políticos. «Uno puede retroceder en la historia y ver lo que ocurrió con el SSC. Y sí, es triste», afirma Lockyer. «El carácter internacional de DUNE es un gran paso adelante», añade. Contar con el compromiso y la financiación de más de un país debería contribuir a que el destino de DUNE no sea el del SSC. «Yo creo que se construirá», dice Loycker. Aunque matiza: «Pero ¿podría no ser así? Sí». IyC

PARA SABER MÁS

Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) conceptual design report volume 2: The physics program for DUNE at LBNF. Colaboración DUNE. Disponible en **arxiv.org/abs/1512.06148**, diciembre de 2015.

Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) conceptual design report volume 1: The LBNF and DUNE projects. Colaboración DUNE. Disponible en **arxiv.org/abs/1601.05471**, enero de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

IceCube: Astrofísica desde el hielo. Carlos Pérez de los Heros en *IyC*, marzo de 2013.

Mensajeros fantasmales de nueva física. Martin S. Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod en *IyC*, junio de 2013.

Un nuevo método para estudiar las oscilaciones de neutrinos. Helen O'Keeffe en *IyC*, octubre 2016.

por Elisa Mora y Miquel Arnedo

Arañas de trampilla de las islas Baleares

¿Cómo lograron colonizar el archipiélago más aislado del Mediterráneo?

Las arañas de la familia de los nemésidos se caracterizan por ser robustas, pilosas, de mediano tamaño y de coloraciones pardas. *Nemesia* es el género más diverso y de distribución más amplia en el Mediterráneo (67 especies y muchas otras por describir). Con él se halla emparentado *Iberesia*, de distribución más restringida, que habita en la península ibérica y las islas Baleares. Ambos géneros reciben la denominación común de arañas de trampilla, en referencia a la «tapa», de formas diversas y a menudo camuflada, con la que protegen los nidos tubulares que ellas mismas excavan en el suelo y desde donde sorprenden a sus presas. Debido a su largo ciclo de vida y su limitada capacidad de dispersión, constituyen un sujeto de estudio ideal para las investigaciones biogeográficas.

En las Baleares se conocen seis especies endémicas de nemésidos. Pero ¿cómo llegaron a las islas? ¿Dónde viven sus parientes más cercanos? Para contestar a estas preguntas, nuestro grupo de investigación realizó un estudio donde se combinaron datos de campo con análisis de parentesco mediante técnicas moleculares. Se establecieron las relaciones evolutivas entre la fauna insular y peninsular, y se determinaron mediante reloj molecular las edades de divergencia de las diferentes especies, que fueron comparadas posteriormente con la historia geológica de la región.

Nuestros resultados sitúan al ancestro de la mayoría de las especies actuales de las Baleares en la masa de tierra continua que antiguamente formaron la región Bética y las Baleares. Las especies insulares de hoy son descendientes de aquellas que quedaron aisladas al escindirse las islas de dicho territorio, durante la transgresión marina Tortoniense, acaecida hace entre 11,6 y 7,2 millones de años. Más tarde, durante la crisis salina del Messiniense, datada hace entre 5,9 y 5,3 millones de años, los movimientos tectónicos provocaron la desconexión del Mediterráneo y el Atlántico y la consiguiente desecación del primero. Este fenómeno restableció la conexión terrestre entre la región Bética y las islas, y permitió que el ancestro de la única especie de *Iberesia* balear colonizase las islas. Posteriormente, durante las glaciaciones, las oscilaciones del nivel del mar crearon nuevas conexiones terrestres entre Menorca y Mallorca, momento en que algunas especies aprovecharon para cruzar de una a otra isla.

El estudio del género *Nemesia* y sus parientes forma parte de una línea de investigación sobre el papel de los procesos geológicos como mecanismo de diversificación, y confirma la importancia de estos en la configuración de la biodiversidad actual de la región mediterránea.

—Elisa Mora y Miquel Arnedo
Dpto. de Biología Evolutiva, Ecología y Ciencias Ambientales
Instituto de Investigación de la Biodiversidad, Barcelona



LAS ARAÑAS de trampilla de las Baleares, como esta del género *Nemesia*, son artrópodos robustos, de cuerpo piloso y coloraciones pardas.



NIDO de *Nemesia bristowei* en Can Planiol, Mallorca, con la tapa cerrada (*arriba*) y abierta (*abajo*).

NEMESIA SP. en posición defensiva. Se observan los quelíceros (piezas bucales) ortognatos (que no se cruzan entre sí), un rasgo distintivo del grupo al que pertenece.

por Lino Camprubí

Lino Camprubí es investigador Ramón y Cajal del Centro de Historia de la Ciencia de la Universidad Autónoma de Barcelona e investigador visitante del Instituto Max Planck de Historia de la Ciencia en Berlín.



Los científicos e ingenieros de Franco

La historia de la ciencia y la tecnología transforman lo que sabíamos hasta ahora sobre la construcción del Estado franquista

En 1936, Álvaro de Ansorena, ingeniero agrónomo y director de la Estación Experimental Arrocera de Sueca, en Valencia, amplió la Estación para alojar un nuevo laboratorio de genética. En él hibridaban granos de arroz de distintas variedades con la esperanza de obtener plantas mejoradas, más resistentes o productivas. Si bien la actividad del laboratorio era científicamente modesta, en las décadas siguientes la Estación dominaría las publicaciones sobre genética y variedades de arroz en España.

Al terminar la Guerra Civil, De Ansorena insertó la Estación de Sueca en el Sindicato Nacional de Cereales: él y sus colaboradores negociaban con jefes sindicales y con agricultores los aspectos más variados de la economía arrocera, desde las técnicas de plantado hasta el modo de sortear la escasez de abonos o las semillas que debían plantarse en cada región. Los granos híbridos de arroz de Sueca estaban en la cúspide de una estructura que regulaba la producción, distribución y consumo de arroz a nivel nacional.

No conviene exagerar el poder de este ingeniero: los jefes sindicales respondían a razones políticas, los agricultores a menudo preferían sus propias técnicas y semillas a las impuestas por los expertos, y el estraperlo y la corrupción ponían sus propios límites y vías de escape al sistema. Pero tampoco puede negarse el impacto que tuvo el laboratorio en la economía política arrocera: las técnicas de hibridación adquirieron una nueva dimensión, dado que De Ansorena tenía acceso a los campos de agricultores pertenecientes al sindicato para la llamada selección genealógica, que obtenía cosechas enteras a partir de un solo grano de arroz. En 1952, coincidiendo con la liberalización de precios y el fin de los racionamientos, la variedad *Colusa x Nano* obtenida en Sueca representaba el 75 por ciento de la cosecha nacional, del Delta del Ebro a las nuevas plantaciones del bajo Guadalquivir. Estos paisajes estandarizados a través de las semillas ofrecen una imagen de la economía corporativa en marcha y del papel del Sindicato Vertical en la transformación del territorio y la economía española.

Aunque durante esos años se produjeron avances científicos mucho más espectaculares —pensemos en el descubrimiento de la doble hélice del ADN, en 1953—, si nuestro objetivo es entender el lugar de la investigación en la economía de un Estado moderno, iniciativas aparentemente modestas desde el punto de vista académico como la de De Ansorena adquieren una importancia renovada. Ampliar nuestras expectativas sobre lo que esperamos encontrar en una historia de la ciencia y la tecnología es políticamente revolucionario: tiene el potencial de transformar las categorías con las que comúnmente entendemos los Estados, sus territorios y sus relaciones.

¿Ciencia aplicada?

Nuestro mundo actual está atravesado por aparatos técnicos y teorías científicas. Los imperios y Estados que perecieron, aparecieron o se transformaron en el siglo xx lo hicieron en contextos productivos y geopolíticos imposibles de entender sin hacer referencia a la ciencia y la tecnología. Sin embargo, persiste la brecha entre la historia de la ciencia y las historias generalistas, políticas, económicas o diplomáticas. Con todo, si ampliamos el foco de estudio más allá de innovaciones y descubrimientos, y más allá de las universidades punteras de países ricos, tal vez podremos desentrañar el lugar de la investigación en las sociedades del presente.

En su contribución a *The Routledge handbook of the political economy of science,* el historiador David Edgerton pone la España de Franco como ejemplo de imbricación entre ciencia y economía política. Pero el vínculo vale para cualquier país industrializado o en vías de industrialización: el grueso de la investigación científica y tecnológica de la segunda mitad del siglo xx estuvo dirigida a proyectos de urgencia económica, social o militar. Despreciar esto como «ciencia aplicada» o políticamente dirigida sería olvidar que los complejos militar-industriales han propiciado el desarrollo de nuevos campos y hallazgos tanto o más como se han basado en la aplicación de teorías ya existentes.

La transformación de España: Autarquía y Guerra Fría

Volvamos al período franquista. Los historiadores han señalado el exilio, la represión, el inmovilismo tradicionalista, la endogamia y el aislamiento como claves del «atroz desmoche» perpetrado contra la universidad española. Aunque las universidades de 1970 estaban mucho más pobladas y diversificadas que las de los años treinta, el período de recuperación tras la guerra y la depuración política fue arduo, lento y plagado de retrocesos que aún hoy colean. Sin embargo, fuera de la universidad (si bien no siempre independientemente de ella), el desarrollo de ciertos campos de estudio fue simultáneo a la transformación económica y física de la España autárquica en un país industrializado y aliado de las potencias capitalistas.

¿Cuál fue el papel de la investigación científica en la conformación del régimen franquista y en la construcción del Estado? Esta pregunta solo se puede responder desde el pluralismo científico y político, dos premisas compartidas por muchos



ESTA ARCA grabada con los motivos del bando nacional fue entregada a Franco en 1939 por la Federación Sindical de Agricultores Arroceros, creada en Valencia en 1933. En palabras del líder de la federación Ramón Rodríguez-Roda, el cofre contenía «el arroz de la victoria», cosechado bajo las bombas enemigas para gloria de la patria.

FUENTE: UNA COSECHA DE ARROZ. ILUSTRACIONES ESPECIALES DE GENARO LAHUERTA Y PEDRO DE VALENCIA. FRANCISCO RAMÓN RODRÍGUEZ-RODA. VALENCIA. FSAAE, 1940

autores del presente y sistematizadas en el materialismo filosófico propuesto por Gustavo Bueno: la respuesta variará según la disciplina y el período o sector político del franquismo que elijamos. Tanto «el franquismo» como «la ciencia» son abstracciones que encubren realidades heterogéneas y cuyas partes están en contacto pero no en armonía. No cabe la brocha gorda. Hay que analizar al detalle casos concretos como el descrito más arriba.

Otros ejemplos arrojan resultados inesperados sobre las ideas más comunes acerca de la industrialización y el nacionalcatolicismo. Muchos han señalado que el Consejo Superior de Investigaciones Científicas recibió la influencia del Opus Dei a través de José María Albareda y otros colaboradores. Pero la metodología aquí propuesta le da la vuelta a ese planteamiento y nos lleva a preguntarnos por el papel de científicos como Albareda o arquitectos como Miguel Fisac en la consolidación y evolución del Opus Dei y de la ideología nacionalcatólica. En *El concepto cristiano de la autarquía* (1938), el físico, ingeniero y sacerdote jesuita J. A. Pérez del Pulgar explicaba el vínculo entre investigación y catolicismo nacional: para realizar el ideal católico de sociedad política hace falta independencia económica y, en tiempos de monopolio imperial de recursos, un país de tamaño medio como España debe volcarse en la investigación científica y tecnológica orientada a la producción y sustitución de importaciones. La conexión entre catolicismo e investigación tomó formas muy concretas en la relación física entre laboratorios e iglesias, en la arquitectura moderna y en el diseño y construcción de poblados de colonización. Como consecuencia de esta coevolución, podemos decir que la autarquía y la ideología nacionalcatólica eran científicas y tecnológicas, y no meras guías o moldes externos para las ciencias y las técnicas.

El ideario autárquico e industrializador tuvo entre sus promotores más enérgicos al ingeniero militar Juan Antonio Suanzes y al ingeniero de caminos Eduardo Torroja Miret. El contraste no podía ser mayor. El político totalitario frente al técnico mundialmente reconocido por sus obras y pensamientos acerca de la estética arquitectónica moderna. Sin embargo, fueron colaboradores muy estrechos en diversos proyectos, desde el laboratorio de Costillares en Madrid hasta la construcción de un sistema de presas en el río Noguera Ribagorzana en los Pirineos, pasando por proyectos de normalización de materiales y racionalización del trabajo que supusieron el paso del Estado corporativo al regulador y los primeros pasos de la integración tecnológica europea. Ambos lucharon contra otros ingenieros poderosos por ganar el favor de políticos e inversores y llevar a cabo sus proyectos técnico-políticos. Las élites, enmarcadas en grupos de intereses, pugnaban por decidir a qué dedicar el agua de los pantanos o qué tipo de energía favorecer. En dictadura, y también en democracia, las discusiones técnicas a menudo encierran decisiones políticas de relevancia crucial para la vida de las naciones.

Los científicos e ingenieros que construyeron el franquismo formaban parte de comunidades internacionales más amplias que, a veces, favorecían el éxito de sus proyectos domésticos y otras los convertían en diplomáticos informales. El biólogo José María Valverde y otros promovieron el Parque Nacional de Doñana frente a intereses arroceros y forestales con la ayuda de ingleses de la UNESCO y el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) de la talla de Julian Huxley. Algo tan crucial como los pactos hispanoamericanos de 1953 cobra pleno sentido atendiendo a la geoestrategia detrás de la tecnología aeronáutica y submarina, y la evolución del conflicto de Gibraltar adquiere un nuevo significado cuando se analiza desde la lucha antisubmarina y se atiende a la relevancia militar de la oceanografía física durante la Guerra Fría.

Un último ejemplo de la importancia de las ciencias para las relaciones internacionales son los famosos fosfatos del Sahara español: técnicos españoles, marroquíes, franceses y estadounidenses entraron en negociaciones intensas y secretas en las que los cálculos geológicos y económicos sobre el suculento mercado de abonos podían decidir cuestiones de soberanía.

El debate ya no puede ser si hubo o no ciencia y tecnología en el franquismo, sino hasta qué punto la historia de la ciencia y la tecnología transforman lo que sabíamos hasta ahora sobre la historia de aquel período. IyC

PARA SABER MÁS

Teoría del cierre categorial (5 vols.). Gustavo Bueno. Pentalfa, Oviedo, 1991-1993.

La física en la dictadura: Físicos, cultura y poder en España, 1939-1975. Dirigido por Néstor Herran y Xavier Roqué. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, 2012.

Fascist pigs: Technoscientific organisms and the history of fascism. Tiago Saraiva. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2016.

The Routledge handbook of the political economy of science. Dirigido por David Tyfield et al. Routledge, Nueva York, 2017.

Los ingenieros de Franco: Ciencia, catolicismo y Guerra Fría en el Estado franquista. Lino Camprubí. Crítica, Barcelona, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Científicos en el exilio. Josep L. Barona en *IyC*, abril de 2012.

por Joan R. Villalbí



Joan R. Villalbí, doctor en medicina especializado en salud pública, trabaja en la Agencia de Salud Pública de Barcelona y es profesor de la Universidad Pompeu Fabra. Coordina el grupo de trabajo sobre alcohol de la Sociedad Española de Epidemiología.

Cómo reducir los daños del alcohol

Entre las medidas más eficaces figuran las políticas fiscales y las orientadas a dificultar el acceso a las bebidas

Las bebidas alcohólicas están muy presentes en nuestra sociedad. Su producción y comercio ocupan un espacio relevante en la economía, sobre todo en un país tan turístico como España. Al contrario de otras sustancias con potencial adictivo, como el tabaco o la heroína, el alcohol puede consumirse sin desarrollar dependencia. Ahora bien, tiene la capacidad de generar una adicción muy destructiva en una parte de la población, y las personas que no presentan adicción pueden sufrir igualmente consecuencias adversas, ya sea por un consumo continuado o por un episodio puntual de intoxicación. Por ello, las sociedades avanzadas intentan limitar los daños que causa el alcohol. Actualmente, en las Cortes de España una ponencia está valorando recomendaciones en este sentido, suscitadas por la trágica defunción de una adolescente a finales de 2016 tras una intoxicación etílica que la llevó al coma y, más tarde, a perder la vida.

¿En qué situación nos hallamos? En general, las cosas han mejorado, en parte debido al cambio social y en parte gracias a ciertas medidas reguladoras. Desde los años setenta hasta la actualidad el consumo ha disminuido de 19 a 10 litros de alcohol puro por habitante y año, y con él ha retrocedido la carga de enfermedades y muertes prematuras asociadas al alcohol. Por poner dos ejemplos, la mortalidad por cirrosis hepática es muy inferior a la de décadas anteriores, mientras que en otros países europeos ha crecido. Asimismo, las lesiones por tráfico relacionadas con el alcohol han descendido notablemente. En cambio, en los últimos años han aumentado los episodios de consumo intensivo e intoxicación en adolescentes y jóvenes. El sistema nervioso se halla en desarrollo hasta los 21 años, y en esta fase muestra especial vulnerabilidad a la exposición intermitente a dosis altas de etanol, que pueden causar lesiones permanentes.

¿Cuáles son las acciones más efectivas para prevenir esos daños? En primer lugar, figuran las estrategias para disminuir el consumo de alcohol. Ello puede conseguirse, por un lado, mediante medidas fiscales. Los impuestos sobre el alcohol son extremadamente bajos en España: nulos para el vino, de los más bajos de la Unión Europea para la cerveza, y algo mayores para las bebidas espirituosas, aunque en la franja inferior de la UE. Subir el precio de las bebidas más baratas mediante impuestos daría lugar a un menor consumo, sobre todo en los más jóvenes. Por otra parte, debería reducirse la accesibilidad al alcohol. Ello puede abordarse disminuyendo la densidad de los establecimientos que lo venden, en especial en el medio urbano; revisando los horarios de venta y haciéndolos cumplir rigurosamente; y regulando el consumo en el espacio público. Existen normas autonómicas y ordenanzas municipales en este terreno, pero con una amplia diversidad de contenidos y un cumplimiento desigual.



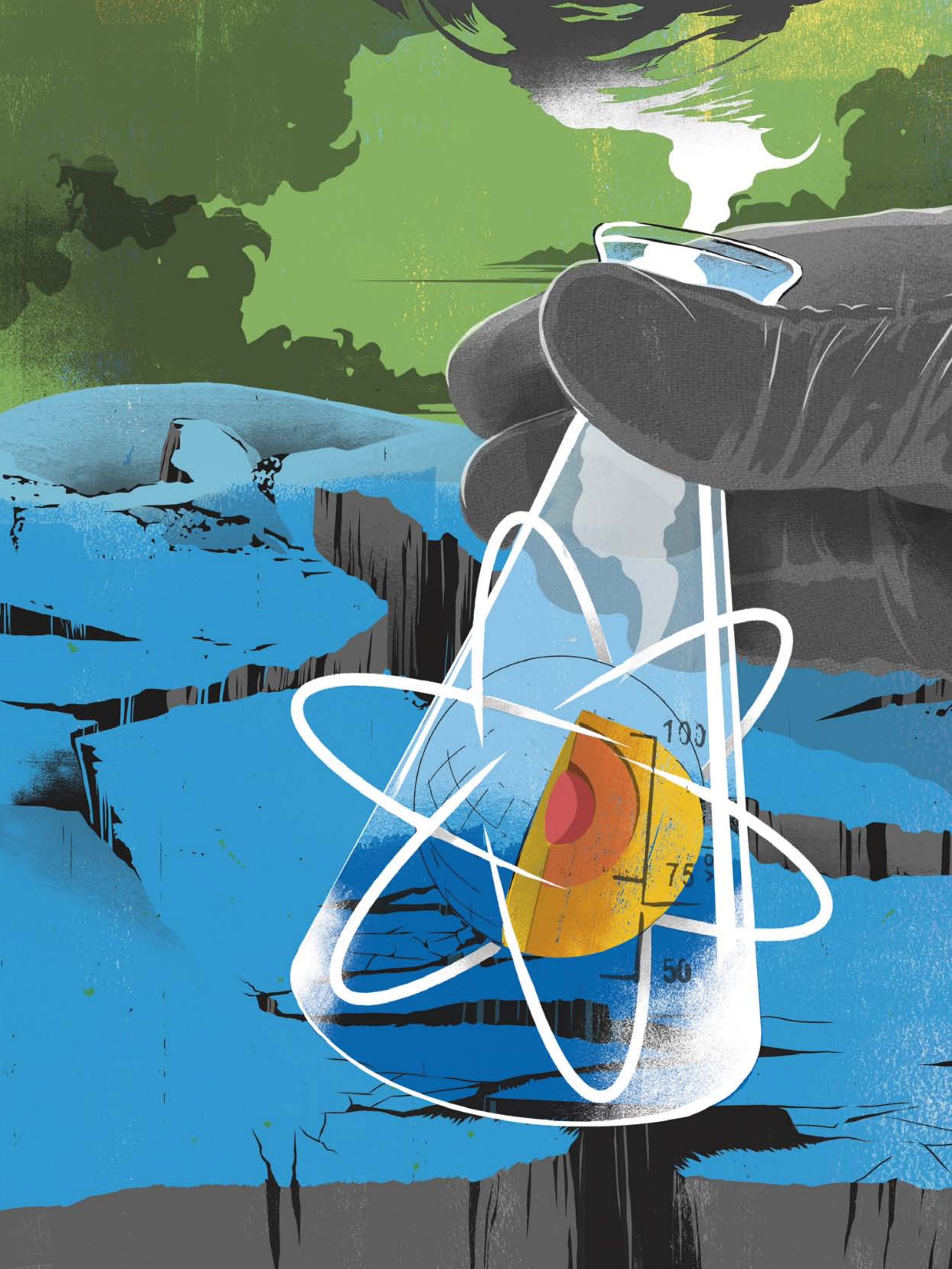
Un segundo conjunto de estrategias son las que intentan evitar que las personas intoxicadas causen daños a otras o a sí mismas. Conviene revisar la normativa sobre alcohol y conducción, que ha tenido un impacto muy favorable en nuestro país. Debería rebajarse hasta cero el límite de alcoholemia en conductores noveles y menores de edad (a los que se prohíbe comprar alcohol pero pueden conducir ciclomotores). Y tendría que reducirse la presencia de publicidad en la vía pública, además de prohibirla en la radio, la televisión y en Internet, al menos entre las 8 y las 22 horas.

Finalmente, se necesitan medidas que ayuden a reducir la ingesta de alcohol a las personas con un consumo de riesgo, y si presentan adicción, a afrontarla mediante un tratamiento experto. Debería incentivarse la detección de los problemas asociados al alcohol y su tratamiento en las consultas de atención primaria y de atención a la salud reproductiva.

Las medidas descritas forman parte del conjunto de recomendaciones avaladas por la investigación internacional y recomendadas por la Organización Mundial de la Salud. Diversos países las han aplicado en distintas formas y combinaciones y han mejorado su situación. Otras políticas (como las charlas educativas a escolares) apenas han mostrado utilidad, aunque a veces las invoquen algunos actores sociales. La educación real se adquiere mediante lo que se ve y se vive, no con sermones desvinculados de la experiencia.

Ante las políticas propuestas es de esperar que algunos grupos de interés generen resistencias. Ya lo han hecho en ocasiones anteriores como con los intentos fallidos de regulación de 2002, 2006 y 2015, pero convendría que ahora primara el valor de la salud. Gobernantes y legisladores deberían seguir la senda abierta años atrás respecto al tabaco, donde las políticas fiscal, reguladora y de asistencia han disminuido el consumo y mejorado la salud de la población.

CHRISTINA CHUNG


100
75
50



La razón, en la cuerda floja

En todo el mundo, la politización de la ciencia está favoreciendo el escepticismo entre la población e impulsando movimientos negacionistas. Ello amenaza con hacer retroceder las protecciones ambientales, recortar los fondos para investigación y socavar el concepto mismo de verdad objetiva. En el Reino Unido, la decisión de abandonar la Unión Europea está desestabilizando la ciencia del país y de toda Europa. Pero no todos retroceden: algunas naciones, como China, ven oportunidades en la agitación. Sin embargo, puede afirmarse que todos los que tienen interés en el devenir de la ciencia se preguntan: ¿qué nos depara el futuro?



1.
LA CRISIS DE CONFIANZA EN LA CIENCIA
James N. Druckman

2.
CIENCIA ABIERTA A LA CIUDADANÍA
Brooke Borel

3.
LAS REPERCUSIONES DEL BREXIT
Inga Vesper

4.
EL AUGE CIENTÍFICO DE CHINA
Lee Billings



EN SÍNTESIS

El año 2017 ha sido sombrío para la ciencia. El tribalismo y el movimiento anticientífico parecen haber triunfado sobre los hechos y la razón. En Europa, el Brexit está perjudicando no solo a los científicos del Reino Unido, sino también de todo el continente. Pero mientras las potencias que históricamente han liderado la ciencia se tambalean, algunas naciones, como China, parecen beneficiarse.

Avanzar requerirá comprender las razones culturales y psicológicas por las que las personas rechazan el pensamiento científico. Muchos investigadores están reconsiderando su desapego tradicional de la política y aprendiendo que la opinión pública es una fuerza que debe tomarse en serio.

La crisis de confianza en la ciencia

La politización del conocimiento científico suscita escepticismo entre los ciudadanos. ¿Cómo se puede evitar?

James N. Druckman

En 2010, *Nature* publicó un editorial donde afirmaba que se estaba observando una creciente tendencia anticientífica que podría conllevar tangibles repercusiones sociales y políticas. Seis años después, la misma revista publicó un estudio que demostraba que cerca de la mitad de los investigadores encuestados convenían en que existía un notable problema de reproducibilidad en la ciencia. Tal vez la primera cuestión tenga sentido a la luz de la segunda: si la ciencia se halla en apuros, los ajenos a ella pueden rebelarse en su contra. Con independencia de si el movimiento anticientífico refleja o no el estado de la ciencia, ambas circunstancias son el resultado de una combinación de factores, entre ellos la politización, las tendencias del razonamiento humano y un evolucionado entorno tecnológico. Por tanto, existen soluciones comunes, y algunas de ellas suponen reconocer que los dos fenómenos no han evolucionado de forma aislada.

EL PROBLEMA

Resultan habituales las referencias a la politización de la ciencia, pero no siempre queda claro lo que ello significa. Cualquier cuestión puede estar politizada, es decir, puede generar un conflicto a través de divisiones partidistas o puede ser debatida por una fuente política (como un funcionario elegido, un candidato o un activista). Generalmente, ese tipo de politización se da en torno a cuestiones donde interviene la ciencia (por ejemplo, la atención sanitaria, el medioambiente y la educación) o se produce en la ciencia básica en sí misma (como los modelos de cambio climático). No cabe duda de que la ciencia se manipula y se usa indebidamente para promover programas políticos.

Un factor crítico, a menudo pasado por alto, es la facilidad con que la ciencia puede politizarse debido a su inherente incertidumbre. En palabras de un experto, «la información científica siempre es, hasta cierto punto, vulnerable a la incertidumbre, puesto que los científicos se han formado para centrarse en ella». La idea básica es que la ciencia puede ponerse fácilmente en entredicho porque siempre existirá la duda y porque cuestionar el conocimiento vigente forma parte del proceso científico.

La manera en que se presenta la ciencia, tanto en el ámbito político como en el científico, depende del razonamiento humano. Un fenómeno bien descrito es el razonamiento motivado, esto es, la tendencia de un individuo a buscar información que confirme sus creencias previas, a considerar más robustas las pruebas coherentes con sus ideas y a emplear más tiempo contraargumentando y desestimando las que no se ajustan a sus opiniones, con independencia de su exactitud objetiva. El razonamiento motivado requiere que la persona posea un objetivo de procesamiento direccional o defensivo; en otras palabras, que sostenga y mantenga una conclusión deseada, congruente con su actitud actual, aun si ello implica rechazar la información que no confirma sus creencias [*véase* «La era de la posverdad», por Theodor Schaarschmidt; MENTE Y CEREBRO n.º 87, 2017]. Por ejemplo, quien no crea que se está produciendo un cambio climático inducido por el hombre puede, en consecuencia, considerar deficiente cualquier prueba de un cambio climático antropogénico, con independencia de su «cualidad objetiva», lo que le permite confirmar su creencia actual.

La pieza final del rompecabezas es el transformado entorno tecnológico del siglo XXI. Hoy pueden consultarse datos de distintas fuentes al mismo tiempo. La gente espera obtener información o datos casi de forma inmediata. El cambio tecnológico es tan profundo que la naturaleza de la memoria se ha transformado debido al almacenamiento de la información y el acceso a esta, lo que acarrea notables consecuencias en el impacto público de la ciencia y en el desarrollo de la labor científica.

DESACREDITAR LA CIENCIA

Los actores políticos y otras partes interesadas suelen poner la ciencia en entredicho cuando contradice sus programas. Siembran incertidumbre en la mente de los ciudadanos respecto a un hallazgo científico y con ello minan el efecto que ejerce la ciencia en sus creencias. Por ejemplo, en un estudio experimental se explicó (aleatoriamente) a una serie de encuestados una declaración consensuada (real) sobre las ventajas ambientales de la energía nuclear respecto a los combustibles fósiles. El conjunto de entrevistados se mostró más dispuesto a respaldar el uso de la energía nuclear. Sin embargo, cuando la declaración venía precedida de una afirmación relacionada con la politización, en la que se destacaban las dificultades de evaluar la ciencia porque esta suele utilizarse selectivamente a favor de programas políticos, los participantes la apoyaban menos. En pocas palabras, la afirmación precedente causó que los individuos desestimaran una prueba científica consensuada debido a su creencia previa relativa a la politización. De ello se desprende que aquellos que

no se benefician de un aspecto particular de la ciencia pueden jugar con la incertidumbre a su favor.

La facilidad con que los escépticos alcanzan al gran público permite desacreditar la ciencia por medio de la politización. La comunicación a las masas ya no gira en torno a unas pocas vías de salida que permiten a la ciencia mantenerse como una autoridad cultural; antes al contrario, los ciudadanos predispuestos a cuestionar selectivamente la ciencia escogen las vías que confirman su escepticismo. La exposición a la información sobre la conspiración científica puede tener repercusiones de gran alcance. Un estudio de 2015 de Sander van der Linden, de la Facultad de Psicología de la Universidad de Cambridge, demostró que el breve visionado de un vídeo acerca de la teoría de la conspiración sobre el calentamiento global disminuía la creencia en el consenso científico sobre las causas humanas del cambio climático. Ello reducía la probabilidad de que se firmara una petición para detener ese proceso y de que se dieran iniciativas prosociales (como donar dinero a una institución benéfica o trabajar como voluntario en la comunidad). Resumiendo, la naturaleza de la ciencia, incluso la más válida, la vuelve vulnerable, y tanto las tendencias del razonamiento humano como un entorno saturado de información exacerban esa vulnerabilidad.



CONSECUENCIAS DE LOS SESGOS

La evolución tecnológica ha transformado el procedimiento científico, un hecho patente en lo referente a la capacidad computacional que también implica una mayor facilidad a la hora de tomar y compartir la información. Esa evolución ha permitido volver a analizar los datos a gran escala y a reproducir los estudios. Muchos ven los resultados de tales esfuerzos como una prueba de la crisis de la ciencia y consideran inexacta buena parte de la información publicada. Así, un artículo reciente ampliamente debatido puso de manifiesto que solo 39 de cada 100 estudios de psicología podrían ser replicados de forma inequívoca. Esos y otros resultados han conllevado la mencionada crisis de reproducibilidad [*véase* «Experimentos evanescentes», por David Teira; Investigación y Ciencia, noviembre de 2015].

Aquí podrían estar interviniendo una serie de factores, entre ellos un sesgo de publicación. La probabilidad de que se publique un trabajo depende del resultado; en general, de si se ha hallado o no una relación estadísticamente significativa. Consideremos la hipótesis de que el envío de mensajes de texto a una persona con el fin de recordarle que haga ejercicio físico le lleva a caminar más (esto es, a dar más pasos). Supongamos que cinco de cada 100 de los estudios llevados a cabo hallan que los mensajes dan lugar a un número mayor de pasos. Si solo se publican los estudios que demuestran un efecto significativo, solo esos cinco entrarán a formar parte de la bibliografía. Ello lleva a que la gente crea en la existencia de una relación entre los mensajes y el ejercicio aun si el conjunto de todos los estudios demuestra claramente que no (los cinco trabajos con resultados significativos serían fruto de la casualidad). Los bajos niveles de replicación pueden reflejar un sesgo en lo que se está replicando. Otro problema son las prácticas científicas cuestionables, como cuando los investigadores informan selectivamente sobre los resultados que apoyan sus hipótesis: dan a conocer los datos relativos a los pasos notificados por los propios probandos pero no los registrados por una pulsera de actividad FitBit; publican solo los resultados derivados de un subconjunto de datos, etcétera.

Así como la tecnología contribuye al estado actual de crisis de la ciencia, también refleja la naturaleza de los científicos. La misma razón que hace fácil la politización de la ciencia de cara al público lleva a los propios investigadores a cuestionar los resultados existentes: pretenden analizar la incertidumbre de cualquier dato y trabajan hasta viciarla mediante la reproducción, la replicación y la generalización. Además, los científicos, y también los que no lo son, hacen uso del razonamiento motivado. Un informe del Comité Asesor de la Fundación Nacional de las Ciencias de EE.UU. afirma que los investigadores tienden a buscar activamente y otorgar más peso a los datos que confirman sus hipótesis y a ignorar o subestimar los que las desmienten. Ese hecho conlleva prácticas cuestionables de investigación y un sesgo de publicación, quedando este último reflejado en la arraigada creencia de que solo deberían publicarse los resultados estadísticamente significativos.

CÓMO ACTUAR

La inherente incertidumbre de la ciencia, el razonamiento motivado y la evolución tecnológica contribuyen, en conjunto, a la idea generalizada sobre el frágil estado de la ciencia, tanto entre

la población como en los mismos científicos. Existen remedios, como inmunizar al público contra los mensajes politizadores engañosos y otros tipos de desinformación. La gente a la que se advierte de que podría recibir una información imprecisa (como que los científicos no creen que el hombre sea la principal causa del cambio climático) tiene menos posibilidades de quedar influenciada por esa desinformación cuando la recibe (es decir, está inmunizada contra ella). Sin embargo, aun a la luz de tales remedios, cabe destacar dos puntos.

En primer lugar, el razonamiento motivado puede contrarrestarse modificando los objetivos y las iniciativas individuales. Ello implica realizar un esfuerzo concertado para comunicar la ciencia de modo que la población comprenda la conexión que guarda con su vida diaria y sus valores, como los efectos locales del cambio climático o los resultados de las intervenciones sociales en las comunidades. Dentro de la ciencia se necesitaría una solución similar que implicara un cambio sustancial de los incentivos. Las instituciones (universidades, asociaciones, revistas especializadas, fundaciones, etcétera) deberían recompensar de formas que no dependieran de los esfuerzos para desarrollar o defender una determinada teoría o relevancia estadística. Se trataría de un desafío, por tres motivos: la lentitud con que se producen los cambios en la ciencia (por ejemplo, cuando los científicos son conscientes de un sesgo de publicación, siguen favoreciendo los resultados estadísticamente significativos); la intrincada naturaleza de la investigación (publicarlo todo sería abrumador desde el punto de vista informativo y se necesita algún sistema de selección); y la posibilidad de una corrección excesiva (es decir, una mayor publicación de las réplicas que derrocan el conocimiento existente de forma más drástica).

En segundo lugar, es crucial que los científicos reconozcan la vertiente pública de su labor. John P. A. Ioannidis, de la Escuela de Medicina de la Universidad Stanford, apunta que los problemas que acontecen en la ciencia pueden minar la credibilidad de los datos publicados y la validez de lo que se comunica a la sociedad sobre la ciencia, además de proporcionar municiones a los negacionistas. Ello no significa que los investigadores deban abandonar el rigor al abordar los mencionados procesos de la ciencia, pero deberían darse cuenta de que la audiencia puede hallarse más allá de la academia. Todo ello acentúa la importancia de trabajar hacia un consenso, cuando sea posible, y avanzar para dar publicidad a los éxitos de la ciencia a la hora de orientar la elaboración y la aplicación de normativas.

James N. Druckman es catedrático Payson S. Wild de ciencias políticas del Dpto. de Ciencias Políticas en la Universidad del Noroeste, en Evanston (Illinois).

Artículo original publicado en *Nature Human Behaviour*, vol. 1, págs. 615-617, 2017. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

PARA SABER MÁS

The Oxford handbook of the science of science communication. J. P. A. Ioannidis, dirigido por K. H. Jamieson, D. Kahan y D. A. Scheufele, págs. 103-110, Oxford University Press, Oxford, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Confíe en mí, soy científico. Daniel T. Willingham en *IyC*, septiembre de 2011.
Promover la confianza en la ciencia. Anita Makri en *IyC*, junio de 2017.

Ciencia abierta a la ciudadanía

Los investigadores exploran nuevas vías para persuadir al público escéptico

Brooke Borel

En 1999, Robert Shapiro, entonces director de Monsanto, pronunció un asombroso *mea culpa* en el congreso de Greenpeace de Londres. Pese a llevar tan solo tres años en el mercado, los primeros cultivos transgénicos de Monsanto se enfrentaban al duro rechazo de la población. Tras su fallido lanzamiento influido por una falta de transparencia, la compañía, según Shapiro, había respondido desde el debate, en lugar del diálogo. «Nuestra confianza en esta técnica [...] se ha considerado, comprensiblemente, como una actitud condescendiente e incluso arrogante», declaró. «Hemos pensado que nuestro trabajo consistía en persuadir y nos hemos olvidado demasiadas veces de escuchar.»

El daño ya estaba hecho. Quince años después, según el Centro Pew de Investigación, solo el 37 por ciento de los estadounidenses consideraba que el consumo de alimentos transgénicos era seguro, frente al 88 por ciento de los científicos. Los organismos reguladores de Estados Unidos debatieron durante años sobre la conveniencia de etiquetar los alimentos transgénicos y el modo de hacerlo [*véase* «Cultivos transgénicos: sigue el debate», por David H. Freedman; Investigación y Ciencia, noviembre de 2013]. En 2015, más de la mitad de los miembros de la UE prohibían por completo los cultivos.

La ciencia no discurre en un mundo aparte. Pero, históricamente, muchos investigadores no han logrado abordar o no han admitido la compleja relación entre su trabajo y la forma en que este se percibe una vez ha abandonado el laboratorio. «La lamentable experiencia que tuvimos con los alimentos modificados genéticamente fue una lección sobre lo que ocurre cuando se produce un fallo a la hora de familiarizar al público con una información precisa y de concederle la oportunidad de pensar en las posibles contrapartidas», afirma R. Alta Charo, experta en bioética y profesora de Derecho en la Universidad de Wisconsin-Madison. Cuando se rompe la comunicación entre la ciencia y la sociedad a la que sirve, la confusión y la desconfianza resultantes lo embarran todo, desde la investigación hasta la inversión industrial y la legislación.



En la era emergente de la técnica CRISPR y el impulso génico (*gene drive*), los científicos no quieren caer en los mismos errores. Las nuevas herramientas proporcionan a los investigadores una capacidad sin precedentes para editar el ADN de cualquier ser vivo; y, en el caso del impulso génico, para alterar el ADN de poblaciones silvestres. Los avances ofrecen la posibilidad de abordar problemas globales de gran envergadura, como mitigar algunas amenazas para la salud, entre ellas la malaria, o desarrollar cultivos más resistentes al cambio climático. Aun si se cumplen las expectativas de CRISPR y el impulso génico y surgen productos relevantes que sean seguros para la población y el ambiente, ¿de qué sirve la técnica más prometedora si el público la rechaza?

«Sin transparencia, podríamos observar cierta hiperpolarización», afirma Jason Delborne, catedrático de ciencia, normativa y sociedad en la Universidad de Carolina del Norte. Los grupos afectados se sentirán marginados, y los promotores no recibirán la crítica constructiva necesaria para mejorar el diseño y la seguridad. «La tecnología corre así el riesgo de sufrir una moratoria irreflexiva ante el mínimo indicio de dificultad», comenta.

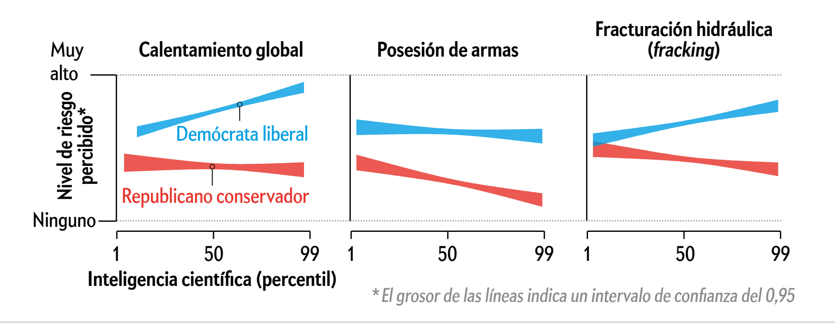
Para evitar esa situación, algunos investigadores están adoptando nuevas tácticas. En lugar de dar a conocer al público una técnica una vez ya está terminada, buscan proactivamente comentarios y reacciones, en ocasiones antes de que haya empezado siquiera la investigación. Según Delborne, la estrategia no implica la desaparición del conflicto político y social, pero sí contribuye a crear un contexto para una innovación más democrática. Al abrir pronto el diálogo con los reguladores, los grupos medioambientales y las comunidades donde se implementarán las invenciones, los científicos ajustan sus planes de investigación mientras ejercen un mayor control sobre la narrativa de su trabajo.

Pongamos como ejemplo el genetista evolutivo Austin Burt. En 2003 publicó el primer artículo teórico sobre el impulso génico. Poco después, con financiación de la Fundación Bill & Melinda Gates, Burt y sus colaboradores lanzaron un proyecto de investigación destinado a analizar si la técnica permitiría luchar contra

CÓMO INFORMAR SOBRE CIENCIA

El deficiente modelo del déficit

La estrategia de referencia de la comunicación científica solía ser el modelo del déficit, según el cual la clave para que la población aceptara una innovación residía en la educación. Bastaba con explicar al público escéptico la ciencia de las vacunas o los organismos genéticamente modificados para que desapareciera la desconfianza. Pero los estudios recientes, como el de Dan M. Kahan, de la Facultad de Derecho de Yale, ponen de manifiesto una relación más compleja en la que intervienen la identidad y las creencias personales. El trabajo de Kahan demuestra que las personas con distintos valores políticos sacarán diferentes conclusiones de los mismos datos, incluso aunque posean conocimientos científicos.



*El grosor de las líneas indica un intervalo de confianza del 0,95

FUENTE: «WHAT IS THE SCIENCE OF SCIENCE COMMUNICATION»? POR DAN M. KAHAN EN *JOURNAL OF SCIENCE COMMUNICATION*, VOL. 14, N.º 3. PUBLICADO EN LÍNEA, 25 DE AGOSTO DE 2015; AMANDA MONTAÑEZ (*gráficos*)

los mosquitos *Anopheles*, transmisores de la malaria. Por aquel entonces, en los días previos a CRISPR, el impulso génico era tan especulativo que no parecía merecer la pena malgastar el tiempo llevando a cabo campañas informativas, afirma Burt. Ahora que la técnica podría estar lista para una evaluación reglamentaria dentro de cinco años, resulta fundamental hablar con las comunidades donde se aplicará, añade el experto. «Así podremos llevar a cabo acciones que no solo serán aceptables para los reguladores, sino también para la población general».

La invitación a reflexionar ha venido sobre todo de aquellos en posesión de las chequeras. En 2016, las Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina de EE.UU. publicaron el libro *Gene drivers on the horizon: Advancing science, navigating uncertainty, and aligning research with public values* («El impulso génico en el horizonte: promover la ciencia, nadar en la incertidumbre y adaptar la investigación a los valores públicos»). Los patrocinadores (algunas agencias federales, la Fundación Gates y la Fundación para los Institutos Nacionales de la Salud) solicitaron específicamente que se siguieran amplias recomendaciones de ética y compromiso público, según Keegan Sawyer, directora del proyecto para el informe. En otros informes de las Academias Nacionales se habían incluido también tales elementos, pero la combinación que apareció en el del impulso génico, según Sawyer, resultaba inusual.

Entre los que atienden a esas directrices se halla la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa de EE.UU. (DARPA). Su nueva iniciativa, Safe Genes, que financiará siete proyectos de investigación planteados para analizar la forma de implantar y controlar el impulso génico, exige que todos sus proyectos presenten minuciosos planes de compromiso público. Entre los beneficiarios de una subvención de la DARPA figura un equipo de Carolina del Norte al que pertenece Delborne. El experto supervisa el compromiso social de un proyecto de impulso génico cuyo objetivo consiste en retirar ratones invasores de islas remotas para proteger a las aves marinas y otros seres vivos. Aunque la investigación todavía sigue en marcha, Delborne comenta a sus colaboradores: «Ha quedado muy claro desde el principio que si la gente rechaza esta técnica por razones éticas o porque existe una preocupación sobre posibles riesgos, aun si los científicos no lo ven así, todo se encamina esencialmente hacia la oposición a ella.» En resumen, los investigadores están dispuestos a detener el proyecto.

Al otro lado, aún más extremo, de esta tendencia se encuentra Kevin Esvelt, ingeniero evolutivo del Instituto Tecnológico de Massachusetts, que contempla el uso de técnicas genéticas para alterar ratones silvestres de forma que no puedan portar o propagar el patógeno que causa la enfermedad de Lyme. El año pasado, antes de comenzar cualquier trabajo de laboratorio, Esvelt visitó la isla de Nantucket, Massachusetts, azotada por la afección, para estudiar si los residentes estarían interesados en una perspectiva genética. Esta incluía el impulso génico, a pesar de que no recomendó esa opción porque pensaba que no se ajustaba al caso. La población aceptó aprovechar la experiencia de Esvelt en impulso génico, aunque está explorando la posibilidad de emplear una estrategia alternativa para inmunizar a los ratones frente al patógeno.

Esvelt se enfrentó a un dilema ético especial acerca del impulso génico, diseñado para difundirse y persistir en el entorno: ¿quién debería decidir si debe aplicarse una técnica de ese tipo y de qué modo debe hacerse? «Me asombra que hayamos atraído tanta atención solo por acudir a las comunidades antes de hacer nada más», afirma Esvelt. «Creo que nos hace reflexionar sobre cómo suele llevarse a cabo la ciencia.»

Que esos esfuerzos reduzcan el miedo y el escepticismo depende de cómo responda a esas cuestiones la gente que acepta participar, afirma Jennifer Kuzma, codirectora del Centro de Ingeniería Genética y Sociedad del Estado de Carolina del Norte. En otras palabras, los investigadores no solo deben estar dispuestos a escuchar la confusión y el rechazo del público, sino también a adaptarse a la situación, aun si ello implica dejar aparcada una técnica que, según ellos, podría cambiar el mundo.

Brooke Borel es periodista y escribe con frecuencia sobre biotecnología.

PARA SABER MÁS

Gene drives on the horizon: Advancing science, navigating uncertainty, and aligning research with public values. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. National Academies Press, 2016.

Las repercusiones del Brexit

La salida del Reino Unido de Europa está desestabilizando la ciencia en el país y en todo el continente

Inga Vesper

La sociedad británica ha premiado siempre la mente científica y ha engendrado genios como el ingeniero Isambard Kingdom Brunel, la bióloga del desarrollo Anne McLaren y el inventor de la Red (World Wide Web), Tim Berners-Lee. Pero en junio de 2016, la reputación del Reino Unido como nación que mira hacia el futuro sufrió un golpe devastador, cuando el 52 por



ciento de los votantes decidió que quería abandonar la Unión Europea. El 29 del pasado marzo, el Gobierno inició oficialmente el proceso de salida, el Brexit. Un complejo de 143 negociadores europeos y británicos deben llevar a cabo unas mil modificaciones en las leyes actuales y decidir qué hacer con los 3 millones de europeos que viven en el Reino Unido y los 1,2 millones de británicos que residen en la Unión Europea. David Davis, el ministro del Brexit, ha calificado la labor de «tan complicada como los alunizajes».

Los votantes a favor del Brexit encuadraban su elección como un paso hacia la soberanía. Pero para los científicos atrapados en la contienda, el referéndum disparó la actual pesadilla de pérdida de talentos, incertidumbre financiera y conmoción política y personal. «No existe ningún plan definido», afirma Mike Galsworthy, investigador de anestésicos y cofundador de Científicos para la UE, grupo de presión con sede en Londres creado en el período previo a la votación. «El país se ha vuelto básicamente menos estable, lo que dificulta que los científicos puedan desarrollar su carrera profesional o realizar planes a largo plazo.» Según un estudio que está llevando a cabo el grupo, más de una quinta parte de la comunidad científica considera la idea de abandonar el país o conoce a alguien que se lo está planteando. Las consecuencias de una diáspora científica desde el Reino Unido podrían deteriorar toda la investigación europea.

El Brexit pone de manifiesto que la ciencia moderna es un sistema cada vez más interconectado en el que reverberan los impactos políticos y sociales. La inestabilidad de un país tiene repercusiones en todos sus colaboradores y en los científicos que allí residen, independientemente de si son ciudadanos o extranjeros. La labor científica depende de la colaboración y, en cambio, el debate central del Brexit está limitando la libertad de movimiento. Mientras que los políticos favorecen las perspectivas de la derecha en materia de inmigración, al sugerir que abrir las fronteras debilita la economía del Reino Unido, numerosos científicos declaran que sus compañeros europeos desconfían de trabajar en el país o colaborar con él. Anne Glover, bióloga de la Universidad de Aberdeen y exasesora científica principal del presidente de la Comisión Europea, afirma que la llegada de estudiantes de la Unión Europea se ha reducido notablemente en Aberdeen y que parte de la plantilla europea ya se ha marchado. Cesare Terracciano, cardiólogo italiano del Colegio Imperial de Londres, afirma que se han suspendido los diálogos sobre las colaboraciones entre su institución y los laboratorios europeos. Directores británicos de proyectos europeos, como Gerry Gilmore, de la Red de Coordinación de Astronomía Óptica e Infrarroja (OPTICON) de la Comisión Europea, podrían perder sus cargos conforme las instituciones se vayan transfiriendo a la Europa continental.

Tales anécdotas se reflejan en cifras que representan un preludio del caos que se avecina. Según el Instituto Británico de Estadísticas Nacionales, un total de 117.000 europeos abandonaron de modo permanente la nación en 2016, un 36 por ciento más que el año anterior. La comunidad científica parece estar particularmente afectada: alrededor del 18 por ciento de los que cuentan con plazas posdoctorales europeas no británicas están buscando trabajo en otros lugares, según un informe del Comité de Investigación de Ciencia y Tecnología del Gobierno británico. Con la caída de la libra, los salarios posdoctorales son ahora menos competitivos, en especial si se comparan con los percibidos en Estados Unidos. El Estudio sobre la Fuerza Laboral en Educación Superior, iniciado el 31 del pasado julio, halló que cerca de un tercio de las universidades han observado un impacto negativo del Brexit en lo referente a la contratación o al mantenimiento de trabajadores de la UE.

Las consecuencias van más allá de los aspectos logísticos. También está creciendo la manifestación de los sentimientos contra los inmigrantes. Según Científicos para la UE, algunos investigadores han sufrido abusos en las calles y sus hijos han experimentado acoso escolar. «Ahora se fijan más en su acento o en el idioma que hablan con sus hijos, de forma que el ambiente se ha enrarecido», comenta Galsworthy. Para el alemán Stefan Söldner-Rembold, director del departamento de física de partículas de la Universidad de Manchester, esos factores «sutiles» pueden tener tanto peso como las decisiones financieras a la hora de decidir dónde desarrollar la carrera profesional. «Plantean dificultades para los compañeros a cuyas familias se les pregunta: ¿Por qué estáis todavía aquí?», afirma. «Uno quiere asegurarse de que los hijos y la pareja tengan perspectivas en este país. Algo que, ahora mismo, no está claro.»

FRAGILIDAD MANIFIESTA

Una de las principales amenazas para la continuidad de la ciencia europea es la cuestión de la pertenencia del Reino Unido al marco de la UE para financiar la investigación, un programa de 33 años de duración. Horizon 2020, la fase actual del programa, cuenta con un robusto presupuesto de 80.000 millones de euros que deben asignarse entre 2014 y 2020; el de su sucesor, el IX Programa Marco, se cifra en 120.000 millones. El Reino Unido es uno de los participantes de mayor éxito y hasta ahora ha recibido cerca del 15,5 por ciento del total de la financiación concedida.

Horizon 2020 solo está abierto a Estados miembros de la UE o a países asociados, como Noruega. Si un país ajeno desea acceder al programa debe pagar una parte al fondo común que depende de su producto interior bruto. Tal y como se halla el clima político en el Reino Unido, cualquier pago a la UE tras el Brexit se enfrentará a una dura oposición. Durante el mandato de la primera ministra Theresa May, el Gobierno ha tratado de tranquilizar a los científicos afirmando que cualquier posible pérdida de financiación se compensaría con dinero nacional. Pero los científicos no se lo creen. «Viendo el estado de la economía británica, probablemente la financiación no cubrirá el gasto del mismo modo», afirma Söldner-Rembold.

Glover, quien ha participado en múltiples proyectos integrados en Horizon 2020, asegura que el valor del programa va más allá del dinero en sí. Cuando trabaja para Estados Unidos, por ejemplo, los científicos de los dos países deben presentar solicitudes separadas y esperar que ambas obtengan la luz verde. Pero los miembros de Horizon 2020 pueden presentar una sola solicitud por proyecto. «Ello me permite trabajar sin problemas con mis colaboradores, como Estonia o Italia», afirma Glover. «La ciencia es un ejercicio internacional. Uno no puede esperar estar en la primera línea si no puede colaborar libremente con los mejores expertos del mundo». Por otro lado, Galsworthy añade que el hecho de que las restricciones en la libertad de movimiento afecten a los permisos y los visados «podría significar nuestra desaparición de Horizon 2020».

Ante semejante perspectiva, los competidores vecinos, así como los gigantes científicos emergentes, como China e India, se muestran deseosos de acoger a los científicos que huyan del Reino Unido. La nación tal vez genere algunos de los artículos de mayor calidad del mundo, pero otros países de la UE se están poniendo al día en cuestión de volumen de publicación y reconocimiento. Hoy en día la UE genera el 34 por ciento de la producción investigadora mundial, y países como Alemania, Francia, Suecia y Holanda ven el Brexit como una oportunidad para cazar talentos.

Efectivamente, la ciencia británica es excelente pero frágil. Con una población de tan solo 65 millones, el país es más bien pequeño y sus laboratorios cuentan con equipos de seleccionados expertos internacionales, de los que un 20 por ciento procede de la UE. La pérdida de un científico hiperespecializado puede causar el derrumbe de una organización entera. Según el grupo de presión Universidades del Reino Unido, más de la mitad de la producción investigadora del país nace de colaboraciones internacionales, frente a un porcentaje inferior al 40 por ciento en Estados Unidos. La conmoción de su sistema podría destruir el liderazgo del país.

Sin embargo, Thomas Jørgensen, coordinador jefe de normativas de la Asociación de Universidades Europeas, un grupo de interés para las universidades, considera ridícula la idea de que el padecimiento del Reino Unido favorecerá de algún modo a sus vecinos. El país aloja algunas de las mejores instituciones científicas, como las universidades de Oxford y Cambridge, que suelen encabezar las clasificaciones mundiales. (Cerca del 13 por ciento de la financiación de ambas universidades procede de la UE.) El sistema científico británico es excepcional en Europa, sobre todo porque emplea un idioma que casi todos los niños europeos aprenden en el colegio. «El Reino Unido funciona bien porque su ambiente científico reúne un infinito número de variables que sencillamente no pueden reproducirse», explica Jørgensen. «La ciencia no es una fábrica. No puedes trasladarla sin más a otro lugar.» El experto teme que el perjuicio derivado de cerrar el grifo del talento debilite la competitividad científica del continente entero: «De forma sistemática, menoscabar al compañero más fuerte perjudica a todo el mundo».

Un buen número de universidades, a menudo acusadas de mantenerse al margen del revuelo que ocasiona la política impulsada por las emociones, están reconociendo ahora que dependen dolorosamente de él. El grupo Científicos para la UE ejerce presión para asegurar que el Gobierno británico utilice hechos empíricos que faciliten el Brexit, pero se trata de una lucha ardua en un clima político dominado por los lemas y la desinformación. A finales de 2016, el Comité Restringido de Ciencia y Tecnología recomendó que el recién creado Ministerio para la Salida de la Unión Europea contratara a un asesor científico jefe que facilitara pruebas empíricas acerca del Brexit. El puesto todavía no se ha ocupado. Evidentemente, el Brexit nunca giró en torno a los hechos y a la lógica. El referéndum ganó por los pelos en el contexto de un discurso de orgullo herido y unos ciudadanos que se sentían estafados. Y ahora, en un extraño vuelco, unos frustrados científicos europeos están optando por abandonar el país por su propio pie.

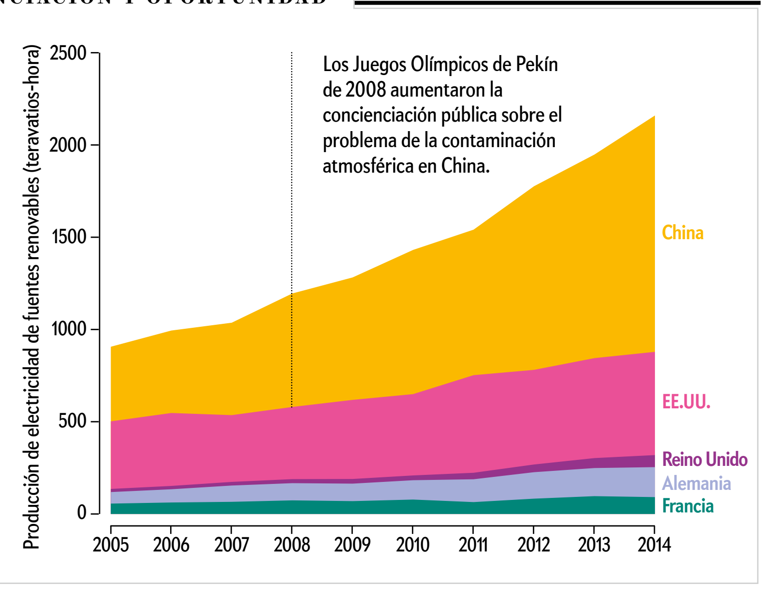
Terracciano, el cardiólogo italiano, ha pasado muchas noches en vela preocupado por la ciencia británica. Según él, esta se halla al borde de un círculo vicioso: la pérdida potencial de financiación, unida a una reputación dañada, hace que el país resulte menos atractivo para la investigación, lo que a su vez agrava la pérdida de talentos. Pero comprende las motivaciones de sus compañeros europeos para buscar nuevos lugares donde investigar. «La gente se está marchando porque sus años de servicio y dedicación no están siendo reconocidos», opina. «Todos estamos enfadados por haber apostado por el caballo equivocado.»

Inga Vesper, periodista germano-británica residente en Londres, se ha especializado en clima, medioambiente y política. Cuenta con diez años de experiencia informando sobre ciencia en la UE.

CONCIENCIACIÓN Y OPORTUNIDAD

Reto ambiental

Buena parte del impulso de China hacia el desarrollo de energías renovables puede verse como una respuesta ante la creciente inquietud social acerca de sus peligrosos niveles de contaminación. La industrialización desenfrenada conllevó una fuerte degradación ambiental, con el aire de las ciudades colmado de hollín. Pero esa no es la única motivación. China también ve una oportunidad para desarrollar y desplegar técnicas de energías renovables con las que, presumiblemente, muchas naciones querrán contar para mitigar las emisiones de carbono. Esa es una de las razones por las que la empresa de reactores nucleares de Bill Gates, TerraPower, ha colaborado con China. Simplemente, no vieron en EE.UU. el interés, la inversión y la oportunidad.



El auge científico de China

Ante la oportunidad de liderar, China despliega energía limpia, satélites cuánticos y proyectos de genómica

Lee Billings

El pasado junio, cuando el presidente de EE.UU., Donald Trump, anunció su retirada del acuerdo climático de París, todas las miradas se posaron angustiosamente en China. En ausencia de la nación que históricamente ha sido el mayor contaminador del planeta, a los expertos les preocupaba que el presidente Xi Jinping contemplara una forma de eludir el compromiso de su país en lo referente a la reducción de las emisiones de carbono. Por el contrario, Xi, antes dedicado a la química, reiteró firmemente el compromiso de invertir en energía renovable y alcanzar sus objetivos respecto a las emisiones. De hecho, China ya ha superado con creces algunas de sus metas.

La innovación en células fotovoltaicas y reactores nucleares de nueva generación constituye solo una parte de la enorme inversión del país en investigación científica. Si se tiene en cuenta que el desarrollo tecnológico supone cada vez más el motor del crecimiento económico y el fortalecimiento de una nación, el apoyo a la investigación básica y la ciencia aplicada representa su combustible. Durante buena parte del siglo pasado, EE.UU. mantuvo el dominio en ese ámbito. Pero, a medida que la actual Administración trata de reforzar la industria del carbón, recorta los presupuestos en investigación, cuestiona el valor de la Agencia de Protección Medioambiental y menosprecia la toma de decisiones basada en hechos empíricos —y con ello cede de forma voluntaria el liderazgo científico a escala mundial—, China se apresura a ocupar su lugar, con unas implicaciones potencialmente profundas para el mundo.

«El desarrollo de la tecnología china beneficiará a todos», afirma Robert Daly, director del Instituto Kissinger sobre China y EE.UU. en el Centro Internacional Woodrow Wilson para Investigadores en Washington D.C. «Pero conforme el país aumente su extenso poder, tendrá mayor capacidad de modelar un ambiente global que se preste más a los objetivos del Partido Comunista chino y a sus ideas retrógradas sobre el modo en que los individuos, las instituciones y la información se relacionan con el Estado.» Ello incluye espinosas cuestiones sobre regulación y propiedad intelectual, mucho más laxas allí que en Occidente.

En ese aspecto, la piedra angular del auge de China es su decimotercero Plan Quinquenal, que cuenta con la investigación científica y la tecnología como los motores clave del crecimiento económico. El resultado son 1,2 billones de dólares dedicados a I+D entre 2016 y 2020, de los que 373.000 millones se prevén adjudicar únicamente a energías renovables. Además, la iniciativa decenal Made in China 2025 financia los avances en campos como la inteligencia artificial, la computación en la nube, la robótica, la biotecnología y los vehículos eléctricos.

Los planes ya están dando sus frutos. En términos de poder adquisitivo relativo, hoy, China invierte más en investigación y desarrollo que la Unión Europea. Y según la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo, sigue el buen camino para superar el gasto de EE.UU. hacia 2020. En la última década, las contribuciones de China al volumen total mundial

FUENTE: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*)

de artículos científicos en revistas especializadas se han elevado del 13 al 30 por ciento, y actualmente solo EE.UU. genera un mayor número de artículos de alta calidad. Hoy ostenta la red ferroviaria eléctrica de alta velocidad más larga del mundo, así como el radiotelescopio más grande y los dos superordenadores más rápidos. Este año ha iniciado un comercio de derechos de emisión de carbono que eclipsará al mayor del planeta, en la UE. Además de ser el máximo productor de metales de tierras raras para la fabricación de tecnología punta, China encabeza el mundo en lo relativo a capacidad solar, eólica e hidroeléctrica y es, o pronto será, el mayor mercado para productos como los coches eléctricos, los reactores nucleares, los aparatos inteligentes, los robots industriales y las impresoras 3-D.

El país todavía hace frente a algunos obstáculos. Daly sostiene que su sistema de educación superior es deficiente a la hora de estimular el pensamiento creativo. En su publicación de 2016 en *Nature*, Wei Yang, presidente de la Fundación Nacional de China para las Ciencias Naturales, admitió las críticas que afirman que las universidades chinas se han convertido en máquinas de producir artículos, empujadas por clasificaciones que valoran la cantidad sobre la calidad. Aun así, el país continúa estableciendo extensos programas científicos y construyendo infraestructuras faraónicas. Un ejemplo destacable es el BGI (antiguamente, Instituto de Genómica de Pekín), con sede en Shenzhen, en muchos aspectos la empresa de secuenciación genética más grande del mundo. Los 5000 trabajadores de los 47 laboratorios del BGI tienen como objetivo secuenciar los genomas del mayor número de organismos posible, desde los primitivos homininos hasta el arroz y los pandas gigantes. En julio, tras un exitoso proyecto piloto, anunció sus planes de secuenciar 10.000 genomas de plantas y microbios, lo que previsiblemente desencadenará una avalancha de datos que podría revolucionar la disciplina.

La motivación de China para liderar el ámbito científico va más allá del prestigio y el beneficio económico. Consideremos el caso de su satélite Experimentos Cuánticos a Escala Espacial (QUESS), una nave que la nación lanzó en 2016 como parte de un programa más amplio de misiones científicas espaciales. En la órbita terrestre baja, el sistema especializado de láseres y óptica del QUESS pone a prueba los fundamentos de la mecánica cuántica. Pero el logro más significativo del satélite, registrado el pasado junio, consistió en la primera transmisión de un entramado de fotones a estaciones terrestres localizadas a 1200 kilómetros de distancia. Una red de tales satélites podría conformar la columna vertebral de una red de comunicaciones cuánticas imposible de piratear.

Algunas voces de Occidente pueden ver el creciente poder del país como una amenaza geopolítica. Es cierto que «China está llevando a cabo una serie de cuantiosas inversiones estatales justo cuando EE.UU. está perdiendo su interés por el riesgo», comenta Ben Shobert, del Instituto Nacional de Investigación Asiática, en Seattle. Pero el aumento acelerado de I+D de China es, en este momento, inevitable, según Michael O'Hanlon, de la Institución Brookings en Washington D.C. «Los impresionantes presupuestos en investigación y desarrollo tecnológico representan el siguiente paso para que se convierta en una gran potencia», añade. «No es una fase; es una nueva realidad. Van a seguir hacia delante sin rendirse. Y si yo estuviera en su lugar, tampoco lo haría.»

Leo Billing es editor de *Scientific American* especializado en ciencias espaciales y física.

PARA SABER MÁS

Nature Index 2017 China. Suplemento de *Nature*, vol. 545, 25 de mayo de 2017. www.natureindex.com/supplements/nature-index-2017-china/index

EN NUESTRO ARCHIVO

¿Puede China continuar su ascenso? Philip G. Altbach y Qi Wang en *IyC*, diciembre de 2012.



ESTOS PESCADORES del mar de Cortés están capturando corvinas. La culpa de la desaparición de la vaquita se atribuye a la pesca, pero el crimen organizado y algunos funcionarios corruptos del Gobierno también están bajo sospecha.

Réquiem *por la* vaquita

Lo que la desaparición de una marsopa mexicana nos enseña acerca de la extinción en el siglo XXI

Erik Vance

Erik Vance es escritor científico especializado en medioambiente y neurociencias.



LA VAQUITA MARINA, una pequeña marsopa, tiene una talla similar a la de la codiciada totoaba, por lo que queda atrapada en las redes de esta y muere ahogada.

LA NOCHE CAE sobre el extremo norte del mar de Cortés. Todo está sumido en una calma chicha. Los charranes y los pelícanos han ido a sus dormideros, y las bandadas de delfines ya no saltan sobre el agua a centenares. Los leones marinos se han dirigido a tierra firme para pernoctar. El agua, habitualmente encrespada, de color achocolatado, aparece lisa como un espejo. El ocaso es el mejor momento del día para navegar por el tercio superior del golfo de California, como se denomina también a esta masa de agua marina, aprisionada contra el desierto mexicano, cerca de la frontera con EE.UU. El sol abrasador da paso a franjas de tonos naranjas, rosáceos y encarnados que tiñen el agua con reflejos danzantes de luz crepuscular.

Ensimismado en lo que me rodea, casi olvido que me hallo a bordo de una embarcación que enarbola una bandera pirata y me pregunto si acaso seremos abordados de improviso por una partida de pescadores enojados y armados. Nick Allen, contramaestre de este barco de más de 50 metros de eslora fletado por la Sociedad de Conservación Sea Shepherd («pastor del mar»), está halando una línea de palangre ilegal de 1200 metros de largo. Hasta el momento con ella han salido un par de anguilas muertas y un tiburón martillo, una especie amenazada. Pero entonces aparece el auténtico trofeo. «¡Totoaba! ¡Allí, allí!», exclama.

El pez apresado en uno de los anzuelos, aún vivo, mide más de un metro, tiene forma de dirigible y está valorado en miles de dólares. Sin titubear, el equipo de Sea Shepherd se dispone a liberarlo. Durante los últimos cuatro meses, la veintena de tripulantes han estado sacando redes esparcidas por las aguas del extremo norte del golfo. Desde que iniciaron la labor, han recogido más de un centenar de aparejos abandonados y docenas de totoabas muertas, junto con leones marinos y otra fauna protegida. Casi cada noche su radar detecta pescadores que calan nuevas redes desde esquifes que dejan atrás con facilidad a los botes de las autoridades locales. Durante el día, la tripulación pone en vuelo drones que vigilan a los pescadores ilegales para descubrir los lugares donde calan sus redes, casi ante las mismas narices de las autoridades, como si se tratara de otra jornada más en la mar.

Pero, en realidad, a los ambientalistas no les interesan las totoabas. Están aquí por una marsopa diminuta cuya extinción es prácticamente inevitable. A menudo denominada marsopa del golfo [de California], los lugareños la llaman vaquita. Con demasiada frecuencia queda enmarañada en las redes caladas para pescar las totoabas y muere. «¡Ahí va, ahí va!», grita alguien cuando el gran róbalo se contornea con fuerza y desaparece en el turbio mar en cuanto cortan el anzuelo. «Esa estaba bien sana.»

Los tripulantes de Sea Shepherd no suelen ser bienvenidos en los conflictos de pesca. Famosos por su acoso a los balleneros japoneses en aguas del Ártico, son el último recurso entre los activistas. Odiados por las comunidades de pescadores de todo el mundo, su llegada suele significar que todos los esfuerzos diplomáticos en lo que a conservación se refiere han fracasado. En ningún otro lugar esto es tan cierto como en el extremo norte del golfo de California.

El mar de Cortés es uno los ecosistemas más excepcionales del planeta. En sus aguas moran casi un millar de especies de peces, de las que un 10 por ciento no existen en ningún otro lugar. La mitad de las capturas comerciales de México procede de él. Pero los ambientalistas y los pescadores de sus costas andan enfrentados desde hace mucho tiempo. Durante los últimos treinta años han mantenido encontronazos en una espiral de reproches mutuos, corrupción y violencia esporádica en torno a la vaquita. Justo el día antes, en un intento por frenar la ac-

EN SÍNTESIS

Hoy solo sobreviven treinta vaquitas marinas, o marsopas del golfo de California, todas en el mar de Cortés. Durante décadas han muerto atrapadas en las redes de pesca, muchas ilegales, lanzadas para capturar un gran pez llamado totoaba.

La incapacidad de las autoridades para hacer cumplir las normativas pesqueras, las disputas entre científicos, las bandas criminales que comercian con la vejiga natatoria de la totoaba y la ineptitud de México para llegar a un entendimiento con sus pescadores la han condenado.

Docenas de otras especies, desde el leopardo de las nieves hasta los elefantes, afrontan semejantes amenazas. Los biólogos no pueden salvarlas. La responsabilidad recae en los dirigentes políticos, que pueden mejorar las economías locales.

FOTOGRAFÍAS DE CHRISTIAN RODRÍGUEZ; FLIP NICKLIN, GETTY IMAGES (*totoaba*)





MILITARES MEXICANOS interpelan a un pescador al que acusan de lanzar ilegalmente una red en las orillas de Santa Clara. Sin embargo, los furtivos organizados burlan habitualmente a las fuerzas del orden.

FUENTES: ADMINISTRACIÓN NACIONAL OCEÁNICA Y ATMOSFÉRICA DE EE.UU. (*reservas marinas*); *NATIONAL GEOGRAPHIC* (*río Colorado*); MAPPING SPECIALISTS (*mapa*)

tividad ilegal, las autoridades federales anunciaron la prórroga de la veda durante otro año, una medida que lanzó a la calle a los pescadores de un pueblo situado unos kilómetros al este, Golfo de Santa Clara, que exaltados acabaron por prender fuego a diez camiones y varias embarcaciones del Gobierno, además de agredir a los funcionarios de pesca.

Para complicar aún más la situación, los narcotraficantes se están aliando con los pescadores ilegales para controlar el paso de las totoabas a través de la frontera de EE.UU. Las amenazas de muerte contra los funcionarios o los ambientalistas se suceden casi cada semana; en los últimos años, al menos dos pescadores han sido asesinados a tiros. Los antaño pacíficos pescadores salen ahora a la mar fuertemente armados y comparten las rutas de tráfico y los beneficios con los capos de la droga. Con historias en boca de todos sobre laboratorios de metanfetamina cercanos a los campamentos de pesca, y de narcotraficantes que encaramados a camiones disparan desde la orilla a la policía para proteger a las embarcaciones furtivas, el turismo ha caído bajo mínimos.

«Habría que prohibir la pesca en el mar de Cortés», afirma Oona Layolle, artífice de la campaña de Sea Shepherd. «Los mares como este son tan frágiles, con un ecosistema tan rico que, teniendo en cuenta el crecimiento de la población del planeta, deberían ser protegidos.»

Mientras tanto, el censo oficial de las vaquitas ha descendido a una escasa treintena. En un intento desesperado por salvar a este cetáceo, un equipo conjunto de EE.UU. y México planea capturar tantos ejemplares como sea posible para llevar a cabo su cría en cautividad.

Próxima a compartir el fatal destino de la paloma migratoria, la vaquita marina constituye uno de los fracasos más estrepitosos de la gestión de la naturaleza en estos tiempos, por lo que su historia tiene grandes lecciones que enseñarnos sobre el carácter de la extinción en el mundo moderno. La especie no ha sido exterminada por los colonizadores, como el desafortunado dodo, ni por el desenfrenado desarrollo humano, como en el caso del delfín fluvial chino. A diferencia del tigre siberiano o del rinoceronte blanco, carece de valor comercial. Lo que ha acabado con ella es un cóctel funesto de codicia y corrupción, de manifiesta negligencia gubernamental, de debates bizantinos entre los círculos científicos en torno a las razones originales de su declive, y la incapacidad de México para aprovechar la buena voluntad de los pescadores. Y si bien estas lecciones tal vez lleguen demasiado tarde para la vaquita, podrían salvar innumerables especies que se hallan al borde de la extinción por doquier.

DESCUBIERTA hace apenas unas décadas, la vaquita no siempre fue motivo de conflicto. En 1950, el célebre biólogo marino Ken Norris vagaba por las playas del norte del golfo de California cuando tropezó con el cráneo de una marsopa que yacía al sol; su forma era extraña y su talla diminuta. Ocho años después publicó un artículo donde daba a conocer a la marsopa del golfo de California, sin haber visto un solo ejemplar vivo.

Durante los veinte años siguientes, el cetáceo fue poco más que un espectro, avistado en raras ocasiones cuando se encontraba algún individuo varado en las cercanías de algún pueblecito pesquero. Los investigadores se preguntaron si la pesca de la totoaba podía estar poniendo en riesgo su supervivencia. La totoaba es un róbalo muy apreciado que cada primavera se congrega en las ricas aguas cercanas a Santa Clara. Con sus algo más de 45 kilogramos, es tan grande como la vaquita, cuyo tamaño equivale a dos tercios de una marsopa corriente. Así que no resulta sorprendente que ambas queden atrapadas en las mismas redes de enmalle.

En 1975 se desató una gran preocupación por el colapso de la población de totoaba, por lo que México prohibió su pesca. Tres años más tarde, otra nueva ley protegió también a la vaquita, a pesar de que pocas personas habían visto alguna en su vida, aparte de los pescadores. A diferencia del atrevido delfín o del curioso león marino, la vaquita se aleja de las embarcaciones y evita a toda costa la presencia humana, por lo que resulta difícil salvar a un animal del que no se sabe nada. La situación cambió en 1985, cuando el biólogo Alejandro Robles, apodado

«Waffles», llegó a Santa Clara. Entonces era un joven y apasionado graduado del Instituto Tecnológico y de Educación Superior de Monterrey, sito en Guaymas, y había acudido para averiguar si las totoabas estaban realmente en peligro o si su pesca podía reabrirse de nuevo. Pero, en secreto, quería encontrar a la esquiva marsopa. Pronto comprobó que el destino de ambas especies se hallaba indisolublemente unido.

Waffles descubrió enseguida a los pescadores ilegales de totoaba ante la vista de un inspector de pesca. En lugar de poner fin a su actividad o de ordenar su detención, el funcionario estaba contemplando cómo sacaban su captura del agua. En aquella época los pescadores no desconfiaban de los biólogos, por lo que invitaron a Waffles a subir a bordo y, de paso, ayudar a halar sus redes ilegales. Un día de primavera sacaron una captura sorprendente: dos vaquitas adultas y dos jóvenes. «Ver morir a una familia entera fue un momento muy triste para mí. Pero era consciente del valor de aquellos especímenes», confiesa Waffles, un hombre fornido pero jovial, cerca ya de los sesenta.

Se le ocurrió que aquellos animales desafortunados podían dar respuesta a múltiples preguntas en el laboratorio. El cetáceo más pequeño del mundo posee círculos negros alrededor de los ojos y de la boca, como si se hubiera pintarrajeado con un lápiz de labios. ¿Qué finalidad tienen esas marcas faciales en esas aguas de visibilidad casi nula? ¿De qué se alimentaban? ¿La familia capturada estaba sana o había sido afectada por la contaminación? La cooperativa de pesca le dejó congelar los cuerpos en sus instalaciones, tras lo cual tomó los dos adultos y se dispuso a subir al autobús que, en un trayecto de diez horas, lo llevaría hasta Guaymas, en el sur, donde los biólogos del instituto podrían examinarlos debidamente. Cuando subió acarreando dos pesados bultos, el conductor le lanzó una mirada suspicaz y le preguntó qué demonios llevaba consigo.

«Vaquitas», le respondió.

«¿Ah, como el palo fierro?» le replicó este, en alusión a una madera dura que en aquellos lugares emplean en la talla de esculturas.

«Umm, pues sí», le contestó Waffles mientras tomaba asiento. Pero había olvidado que en el camino atravesarían un puesto aduanero. Y para espanto del conductor, los agentes sacaron del autobús el par de bultos medio descongelados y le pidieron la documentación. Waffles les presentó un permiso para huesos de ballena, rezando por que no lo miraran demasiado. Perplejos y vacilantes ante el hallazgo, entretanto el resto del pasaje comenzaba a protestar por el retraso.

«Así que acabó diciéndoles: "Muy bien caballeros. Si los quieren, quédenselos"», recuerda. «A lo que los agentes de aduanas le replicaron: "¿Y para qué querríamos esto? Está bien, puede marcharse."»

La relación mutuamente beneficiosa entablada entre los pescadores y los científicos prosiguió durante años. Los biólogos mexicanos y estadounidenses que llevaron a cabo las necropsias confirmaron que la vaquita se alimentaba en el fondo del mar y que se reproducía solo cada dos años. Pero restaba una pregunta crucial: ¿Por qué era tan escasa? La respuesta obvia apuntaba a las redes para la pesca de la totoaba, pues todos los especímenes conocidos del cetáceo habían quedado atrapados en ellas.

Pero ese razonamiento perdía de vista un actor tan grande como crucial: el río Colorado. A lo largo de casi un siglo, EE.UU. ha ido levantando presas en su cauce para suministrar agua a los campos de regadío y a las poblaciones en auge. En los años ochenta, su caudal había menguado tanto que ya no desembocaba en el mar de Cortés, con lo que, después de milenios, había



dejado de aportar agua dulce a ese extremo del golfo. Cientos de kilómetros cuadrados de mezquitales y estuarios se convirtieron en polvo y sal en la ahora reseca desembocadura. Los expertos se preguntaron si era mera coincidencia que una de las extinciones más notorias de Norteamérica estuviera ocurriendo a pocos kilómetros de uno de los mayores desastres ambientales.

Manuel Salvador Galindo Bect, oceanógrafo hoy jubilado y entonces en la Universidad Autónoma de Baja California, estaba convencido de que existía un vínculo, mientras señalaba a las diezmadas poblaciones de camarones en la parte superior del golfo. «El problema del camarón surgió casi al mismo tiempo que el de la vaquita», comenta. Al principio esta incógnita científica era poco más que pura curiosidad, pero no tardaría en convertirse en la pieza central de una pugna política de altos vuelos que condenó al fracaso los esfuerzos para salvar a la vaquita.

LAS NECROPSIAS fueron la principal herramienta al alcance de los investigadores para averiguar si los cambios acaecidos en el tercio superior del golfo de California estaban perjudicando a las esquivas marsopas. El rey de las necropsias era Jorge Torre, entonces en el Instituto de Monterrey. «Si me dice un número de catálogo, sabré qué vaquita era. El 930206 correspondía a una hembra grávida», me indica con orgullo. «Dediqué un lustro de mi vida a desvelar las intimidades de la vaquita.»



ESTAS TOTOABAS MUTILADAS han acabado abandonadas en el lecho seco del río Colorado. Los pescadores capturan esta especie protegida y la destripan para extraer su vejiga natatoria. Las redes mafiosas envían el órgano a China, donde en el mercado negro se cotiza en miles de dólares por sus supuestas virtudes medicinales.

Torre comprobó que la forma del hioides difiere según el sexo del cetáceo, lo que indica que machos y hembras emiten vocalizaciones distintas. Él y otros expertos descubrieron un dedo extra en sus «manos», peculiaridad que ensancha las aletas con un propósito aún sin dilucidar. Y así prosiguieron las pesquisas. Sin duda, la vaquita marina estaba en peligro, pero ni los pescadores ni la opinión pública repararon demasiado en ello.

Hasta que se produjo un giro de los acontecimientos. Por aquellas fechas se estaba redactando el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN). Las negociaciones para el acuerdo dieron comienzo en 1990 y el presidente mexicano Carlos Salinas supo ver con presteza el negativo impacto ambiental del TLCAN ante la opinión pública. Después de dialogar con los expertos, entre ellos el célebre oceanógrafo Jacques Cousteau, Salinas fijó su atención en la vaquita. Proteger a esta pequeña marsopa en apuros, cercana a la frontera con EE.UU., sería la prueba de su compromiso con la gestión ambiental.

De la noche a la mañana se convirtió en la protagonista de un tira y afloja político. «Toda aquella gente comenzó a llamarme para preguntar: "¿Qué tienen que ver la vaquita y la totoaba con el libre comercio?" Como biólogo, sabía bien poco sobre el significado de este último», relata Waffles.

En una iniciativa de protección ambiental pregonada a los cuatro vientos, México creó en el extremo norte del golfo una reserva para la peculiar vaquita. El parque marino se convirtió en el primer paso que llevaría a la agria relación entre los científicos y los habitantes del golfo. Los biólogos necesitaban a los pescadores para obtener especímenes de estudio, pero a partir de entonces eso sería delito en el parque; al menos sobre el papel. La reserva carecía de plan de gestión, de normativas y de personal que garantizara su cumplimiento. Los grandes arrastreros estaban prohibidos en teoría, pero años después seguían faenando allí. Los pescadores locales desconocían por completo la normativa.

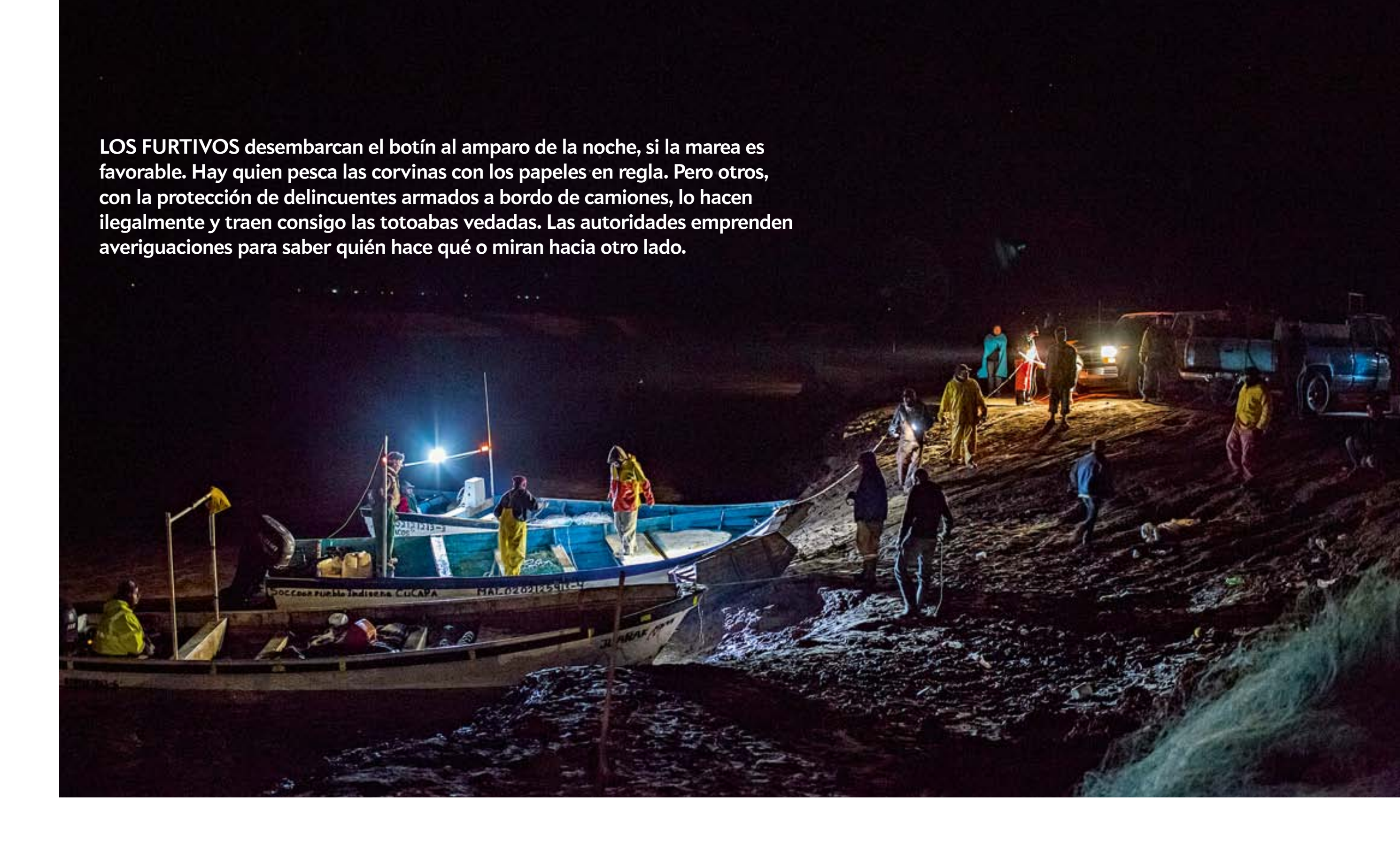
Como consecuencia, la gente no se la tomó en serio. Hasta hoy, ni un solo pescador o infractor ha acabado en prisión por practicar la pesca furtiva. Parte del problema era que Ciudad de México estaba enviando dos mensajes muy distintos. La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del país (SEMARNAT) afirmaba que la amenazada vaquita precisaba protección. Pero el organismo oficial que representaba al sector pesquero, hoy llamado Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA), reclamaba protección para las pesquerías comerciales. Incluso en una ocasión llegó a insinuar que la vaquita no existía, que se había extinguido o que era una invención de los ambientalistas estadounidenses, cantinela que aún hoy sigue resonando por algunas localidades.

La fábula llegó tan lejos que, en el curso de un almuerzo de postín, algunos expertos acabaron mostrándole al secretario de Estado de agricultura y pesca una vaquita muerta sobre un carrito de postres, para demostrar de una vez por todas que existía de veras. Así que CONAPESCA se decantó por el exangüe Colorado y acusó del destino del cetáceo a los ávidos estadounidenses y a sus embalses. Pero las necropsias no revelaban indicio alguno de enfermedad o inanición. Como se vio después, la vaquita se había adaptado a los cambios en la cadena trófica.

Galindo Bect, el oceanógrafo de la Universidad Autónoma de Baja California que se había convertido en el principal portavoz de la tesis del Colorado, reconoce ahora que no tenía ninguna prueba directa de que la vaquita estuviera siendo afectada por el estado del río, pero lo atribuye a que no se llevaron a cabo las investigaciones apropiadas. Los pescadores no tardan en aludir a él. «Conozco al Dr. Galindo», afirma Mario Alberto, un veterano con 25 años de oficio en la mar. «El problema de la vaquita no es un problema de pesca, sino ambiental.»

En 1999, el número de vaquitas siguió descendiendo. Y a medida que se proponían nuevas reservas, la acritud continuaba en alza. Cuando el Gobierno federal de México impuso una veda temporal a toda la pesca en el extremo norte del golfo, al suponer que las vaquitas estaban quedando atrapadas en las redes, los pescadores de Santa Clara quemaron varios vehículos oficiales y organizaron un secuestro simbólico de los responsables locales, que tuvieron que ser evacuados por vía aérea.

En medio del caos, surgió una tercera teoría para explicar el declive del cetáceo: la consanguinidad. Sus partidarios argumentaban que la aparición inesperada de ciertas combinaciones de genes deletéreos en una población pequeña acababa causando una gran mortandad. Había sucedido en Escandinavia, donde poblaciones aisladas de serpientes y de lobos se habían vuelto vulnerables a las enfermedades hereditarias. Las autoridades mexicanas esgrimieron ese argumento para anunciar que la vaquita estaba condenada a la extinción, afirma Lorenzo Rojas Bracho. El experto estudió la genética del cetáceo a finales de los noventa y ahora colabora con el Comité Internacional para la Recuperación de la Vaquita (CIRVA), que asesora al Gobierno mexicano sobre ella. Pero analizó 75 ejemplares facilitados por



LOS FURTIVOS desembarcan el botín al amparo de la noche, si la marea es favorable. Hay quien pesca las corvinas con los papeles en regla. Pero otros, con la protección de delincuentes armados a bordo de camiones, lo hacen ilegalmente y traen consigo las totoabas vedadas. Las autoridades emprenden averiguaciones para saber quién hace qué o miran hacia otro lado.

los pescadores y determinó que el futuro de la especie no peligraba por la consanguinidad. Como su población siempre había sido pequeña y había permanecido aislada, aparentemente la especie ya había depurado los genes letales. Si pudiera eludir las redes de pesca, en teoría la recuperación sería posible.

Desde entonces, Rojas Bracho se ha erigido en uno de los defensores más combativos de la vaquita, dispuesto a luchar contra lo que considera un aluvión de despropósitos procedente de colectivos como CONAPESCA. «No recuerdo ninguna reunión a la que haya asistido en los últimos veinte años en que los tipos de las pesquerías no hayan echado la culpa [del problema] al exiguo caudal del Colorado», asegura. A menudo los encuentros acababan a gritos.

Rojas Bracho desconfía de Galindo Bect y de sus vínculos con los intereses pesqueros. Y este recela del criterio científico de aquel. Lo único en lo que todos coinciden es que la pesca ilegal de la totoaba se halla fuera de control. A inicios del presente siglo, los pescadores, antaño el eslabón vital con esta especie, se habían convertido en su enemigo.

PERO NO SIEMPRE HAN TENIDO al Gobierno en contra. En 2007, este ofreció dinero a aquellos que renunciaran a su licencia de pesca con el fin de que dispusieran de capital para invertir en actividades de ecoturismo. Les dijeron que si construían hoteles, los visitantes acudirían en tropel al norte del golfo. Pero nadie preguntó jamás a los turistas si querrían ir. Mario Mora Rodríguez, pescador con más de veinte años de experiencia, fue uno de los que aceptó el trato. Explica que él creía honestamente estar trabajando por la supervivencia de la vaquita y, al mismo tiempo, por el porvenir de su familia. Construyó una serie de *bungalows* que llamó Tourist Cabins. Nadie vino. Hoy el lugar permanece vacío, junto a otros cuatro hoteles desocupados. La mayoría de sus hijos se han marchado en busca de empleo.

Y el Gobierno, a través de CONAPESCA, acabó concediendo nuevos permisos a otros pescadores, quienes a menudo no respetaban los límites de las reservas. En 2008, por medio de hidrófonos submarinos se detectaron tan solo 245 vaquitas, lo que significa que desde los años noventa sus efectivos habían ido descendiendo a un ritmo anual del 8 por ciento.

Entre 2008 y 2010 el declive se frenó y por momentos se albergaron esperanzas. Pero la escalada del narcotráfico acabó con cualquier posibilidad de recuperación. El presidente Felipe Calderón declaró la guerra a los cárteles mexicanos, lo que supuso el estallido de uno de los períodos más sangrientos que ha conocido el país en su historia reciente. Los cárteles han diversificado sus negocios hasta abarcar la piratería audiovisual, la prostitución, los secuestros y, en el norte de Baja California, el contrabando de la totoaba. «Nos dimos cuenta de que los lugares donde se traficaba con las totoabas eran los mismos donde operaba el cártel de Sinaloa», afirma Andrés Estrada, periodista independiente que ha pasado meses en las comunidades pesqueras investigando el tráfico ilegal del pez. «Las rutas de traslado se asemejaban mucho.»

El tráfico no tiene nada que ver con el pescado destinado a alimentación. Es su vejiga natatoria la que se ha convertido en un ingrediente preciado por la medicina tradicional china. Y puesto que la fuente original de vejigas, el bahaba chino, casi ha desaparecido, los intermediarios han puesto sus ojos en México, donde llegan a pagar hasta 10.000 dólares por kilogramo. Los pescadores furtivos destripan la totoaba en la orilla, le arrancan la vejiga natatoria y abandonan el resto del enorme pez en la arena, donde se pudre al sol.

Estrada y dos valientes colegas, Alejandro Melgoza y Enrique Alvarado, han informado recientemente de que los narcotraficantes no solo pasan las vejigas a través de la frontera hasta Los Ángeles, donde las embarcan rumbo a China, sino que ahora cuadrillas armadas protegen a los pescadores cuando desembarcan la captura en tierra firme, puesto que el precio de su mercancía ya es equiparable al de la cocaína o las metanfetaminas. La pesca furtiva de la totoaba ha pasado a formar parte de las actividades del crimen organizado, como el galopante consumo de drogas en las comunidades de pescadores.

LOS COCOPA, los únicos a quienes se otorgan licencias de pesca de la corvina, afirman que algunos extraños se las apañan para conseguir una y se hacen pasar por miembros de su comunidad para pescar con impunidad corvinas y totoabas.



«No hay sentencias, ni castigo», denuncia Estrada, que presencia habitualmente cómo hombres armados venden metanfetaminas a los pescadores mientras los escoltan durante el desembarque del pescado. Los responsables de perseguir a los furtivos no saben distinguir partes del cuerpo como las vejigas natatorias de especies concretas. Y la policía ambiental, que sí podría hacerlo, carece de la potestad para multar o practicar detenciones. Cuando visité la zona, vi cómo los inspectores de CONAPESCA encargados de supervisar las capturas se limitaban a dar paso a los camiones de pescado echando una breve ojeada a su carga, todo ello a escasos kilómetros de las playas sembradas de totoabas muertas.

En 2014, Samuel Gallardo, uno de los responsables de una cooperativa pesquera, fue acribillado a balazos por un rival afín al cártel de Sinaloa, presuntamente a causa de una disputa por las rutas de contrabando. Un par de años después, otro pescador, José Isaías Armenta, cayó muerto por disparos de la policía local. La explicación oficial es que opuso resistencia durante su detención, aunque ciudadanos de Santa Clara, que quieren permanecer en el anonimato, afirman que el auténtico motivo fue su negativa a pagar sobornos vinculados con el negocio de la totoaba.

ENTRE 2011 Y 2015, después de años de lento declive, la población de la vaquita cayó otro 60 por ciento. En un postrer esfuerzo por salvarla, el Gobierno mexicano declaró en 2015 una moratoria de dos años para toda la pesca con redes de enmalle en las aguas septentrionales del golfo, incluida la del camarón y la de otro pez de menor talla, la corvina. Aunque no tan apreciada como el camarón, la corvina proporciona cientos de puestos de trabajo en el norte del Golfo, desde los pescadores que la capturan hasta la gente del pueblo que la limpia y prepara para su distribución.

Hasta entonces, la economía local dependía de los que poseían licencias para la pesca de la corvina. El Gobierno les paga ahora casi 2000 dólares mensuales por cada licencia, para que no salgan a faenar. Pero solo los pescadores más solventes podían adquirirla, por lo que son pocos en el pueblo los que disponen de una. Los pescadores que trabajan para ellos perciben unos 400 dólares mensuales, bastante menos de lo preciso para llegar a fin de mes. Y los antiguos trabajadores que limpiaban el pescado en tierra firme no perciben nada. En otras palabras, el Gobierno está pagando una fortuna a los más prósperos del pueblo, mientras que los más pobres tienen que apañárselas solos.

Enrique «Gringo» Assaf, titular de siete licencias y patrón de 12 pescadores contratados, explica que el Gobierno le paga unos 10.000 dólares mensuales por quedarse en tierra. Ha invertido el dinero en edificar un hotel y emprender un negocio de alquiler de vehículos todoterreno. Assaf culpa al Gobierno por la inequidad de los pagos asignados a los pescadores y por su actuación chapucera en los planes de conservación.

El pasado marzo, el Gobierno anunció la prolongación de la veda otro año más. Y en ese momento los pescadores tomaron las calles y quemaron los camiones federales, aunque insisten en que la gota que colmó el vaso fue la actitud de un agente federal corrupto, que pretendía extorsionarles. «Uno no sabe lo que sucederá mañana o pasado mañana», lamenta el otrora pescador Alfonso Pita. «Tengo mujer y dos hijas; una es madre soltera de dos niños. ¿Qué voy a hacer? El poco dinero que tenía lo invertí en el bote de pesca.» Ni él ni sus hijas tienen trabajo.

La corvina es deliciosa y su vejiga natatoria también puede venderse en China, aunque por un precio mucho menor que el de la totoaba. Pero, a causa de la moratoria, nadie tiene permiso para pescarla salvo los cocopa, miembros de una comunidad indígena asentada al norte. Las autoridades y los ambientalistas mexicanos aseguran que muchos de los pescadores furtivos de totoaba se las han ingeniado para conseguir licencias de los cocopa y se hacen pasar por miembros de ese colectivo. «Estamos invadidos por los intrusos», denuncia Inés Hurtado Valenzuela, líder de una cooperativa pesquera de los cocopa. Señala que si solo ellos pescaran la totoaba, se la comerían en lugar de arrancarle la vejiga y tirar el resto a la arena, como hacen los furtivos.

No es difícil comprobarlo. Se ofrece a acompañarme a los caladeros de los cocopa. Unos kilómetros al sur de la localidad, el paisaje de mezquitales desaliñados da paso a esteros y salares inhóspitos; es la devastación causada por la desecación del río Colorado. Pese a ello, un pueblo improvisado ha surgido en poco tiempo en medio de aquella tierra yerma. Cientos de pescadores desembarcan allí las corvinas a lo largo de un canal que conecta con el golfo. Mientras circulamos por su ribera veo flotar una totoaba muerta, con las tripas abiertas. Más adelante hay docenas, destripadas con premura y lanzadas al agua. A lo largo del canal solo hay un lugar donde desembarcar las corvinas (o las totoabas ilegales), pero cuando pasamos el punto de control de CONAPESCA emplazado allí, los funcionarios apenas prestan

atención a las corvinas apiladas en la parte trasera de nuestro camión.

Mientras tanto, las vaquitas siguen muriendo. De 2015 a 2016 disminuyeron otro 50 por ciento; los cálculos cifran en apenas una treintena las supervivientes. Cinco se hallaron muertas en la primavera de 2017.





LA ACTIVISTA HILDA SOMOZA (con camiseta blanca) organiza peticiones de ciudadanos de Santa Clara que antes limpiaban y empacaban el pescado. En un intento por frenar el expolio del mar, el Gobierno paga a los titulares de las licencias de corvina para que no salgan a faenar, pero no ofrece nada a los trabajadores de tierra firme, que no tienen otra ocupación. Un frutero de Santa Clara pintó un mural para recordar a la gente que, en medio de las disputas intestinas y la delincuencia, las vaquitas atrapadas en las redes son las víctimas inocentes.

RESULTA FÁCIL DAR CON CULPABLES de la extinción de la vaquita: lo es CONAPESCA, por negarse a presionar a los pescadores; o los pescadores, por no denunciar a los furtivos entre sus filas; o SEMARNAT, por no proteger decididamente a las especies amenazadas; o las fuerzas del orden, por permanecer cruzadas de brazos; o el Gobierno federal de Ciudad de México, por trazar sobre el mapa reservas (tres hasta la fecha) que en el mar no son más que papel mojado; o los estadounidenses, por tomar el agua del río Colorado; o los biólogos y los conservacionistas, por culpar sin tregua a los impotentes lugareños; o los pudientes locales, por mantener en la pobreza a los demás; o los chinos, por crear la demanda y ser la causa inicial del problema; o los cárteles de la droga, por fomentar el furtivismo.

Sea quien sea el culpable, la vaquita representa más que un simple animal solitario que asiste a su propia desaparición en las agitadas aguas del golfo de California. Más bien es un presagio de las extinciones que vendrán en el siglo xxi. Nadie sabe cuál será la siguiente especie en sucumbir, pero sí es posible describirla. Provendrá de una población pequeña y aislada. Su explotación, o la de otra especie que se relacione con ella, será muy lucrativa. Y habitará en un país en desarrollo dotado de unas instituciones deficientes.

Los especialistas señalan docenas de otras especies que afrontan problemas parecidos a los de la vaquita. El delfín del río Ganges, una especie con una distribución geográfica reducida, presenta unas costumbres que le predisponen a caer atrapado en las redes; su número ha descendido más de un 50 por ciento en sesenta años, hasta menos de 2500 en la actualidad. El cazón picudo del norte de Sudamérica ha visto reducidos sus efectivos un 90 por ciento en diez años a causa de su lento ciclo reproductivo y la escasa regulación a la que está sometida la pesca de la caballa.

Los pastores de cachemira de Asia Central matan arbitrariamente al amenazado leopardo de las nieves para proteger sus rebaños de cabras, que proveen a los mercados de lujo en el extranjero. Los rinocerontes, los elefantes y los cálaos de yelmo son todos presas codiciadas, importadas a Asia desde África e Indonesia por redes criminales que se aprovechan de las débiles instituciones de sus países de origen [*véase* «La senda del marfil», por Samuel K. Wasser, William C. Clark y Cathy Laurie; Investigación y Ciencia, marzo de 2010]. Los pangolines (pequeños mamíferos cubiertos de escamas) son capturados por furtivos en Asia y vendidos allí mismo, en el mercado negro, con la connivencia del Gobierno.

En cierta manera, la vaquita ha sido víctima del mismo problema que ahoga a gran parte de México y del mundo en desarrollo. El país simplemente carece de la capacidad para hacer respetar todas sus leyes, sobre todo ante el crimen organizado.

Una lección más dura de aceptar puede ser que, aunque se tienda a pensar en la vaquita como en un tesoro de la humanidad, en realidad pertenece a los pescadores locales. Ellos la vieron por primera vez, le pusieron nombre y proveyeron las muestras y los congeladores a los científicos, que solo entonces informaron a los legisladores, quienes a su vez aprobaron las leyes para limitar la pesca. Sin su ayuda, la conservación de la vaquita resulta imposible.

El mayor error de los conservacionistas, por tanto, consistió en enviar a los científicos a hacer la labor de un trabajador social. Fue el caso de la bióloga Catalina López Sagástegui, quien en 2006 ansiaba colaborar en la conservación de los mamíferos marinos. Después de trabajar en iniciativas vinculadas con la ballena gris cerca de la península de Baja California, se dirigió

al norte del golfo. No tardó en ver que la conservación de la vaquita no era un proyecto corriente. Los pescadores acababan discutiendo a gritos entre ellos y abandonando las reuniones. Confusa y perpleja, se preguntaba: ¿por qué no pueden hallar la solución que les ayudará a seguir adelante?

Formar parte de la comunidad durante diez años le ha permitido darse cuenta de que los problemas que amenazan a la vaquita son ajenos a la ciencia y tienen mucho que ver con las actitudes humanas. Confiesa que ni ella ni muchos otros estaban preparados para lidiar con las fuerzas en liza: «Los conservacionistas no somos expertos en desarrollo social. No puedo creer que ya solo queden treinta vaquitas y que se sigan planteando las mismas propuestas de siempre». Ahora, en una institución transfronteriza denominada Instituto de la Universidad de California para México y EE.UU., López Sagástegui afirma que el Gobierno y las organizaciones conservacionistas han estado intentando agitar una varita mágica que convirtiese a los pescadores en otra cosa sin saber en qué. En lugar de decidir lo que los pescadores no podían hacer (usar las redes de enmalle, pescar las totoabas), deberían haberse dedicado a crear nuevas oportunidades de negocio y a diseñar estrategias sostenibles.

HOY YA NO QUEDAN OPCIONES VÁLIDAS, salvo una. En un último intento a la desesperada, el pasado octubre biólogos de México y EE.UU. recurrieron a delfines entrenados por la Armada estadounidense para acorralar tantas vaquitas como fuera posible, capturarlas y criarlas en cautividad. Si bien la reproducción en cautividad ha salvado a especies terrestres como el cóndor de California, nunca ha culminado con éxito en mamíferos marinos. Y nadie ha capturado nunca una vaquita a propósito, menos aún la ha mantenido con vida lo suficiente para que procree.

Puede que la vaquita se preste a la captura y se habitúe a las condiciones de cautividad sin graves problemas, como su prima la marsopa común. Pero tal vez no sea así. Si la cautividad fracasa, «entonces podremos decir que lo intentamos. Pero todo habrá acabado», se lamenta Barbara Taylor, bióloga marina en la Administración Nacional de la Atmósfera y los Océanos de EE.UU., que está ayudando a dirigir el proyecto de la Armada y ha dedicado su vida al estudio de los cetáceos amenazados. El destino de una especie entera depende de una treintena de individuos y de un plan con pocos visos de éxito que pretende depositarlos detrás de un vidrio grueso.

Este último intento tiene lugar sin la ayuda de los primeros estudiosos de la vaquita. Muchos de aquellos primeros defensores se han quemado por el clima de hostilidad y las intrigas políticas. Hartos del punto muerto, Torre y Waffles abandonaron discretamente el altercado y buscaron empleo en otro lugar. Ironías del destino, ambos practican ahora una nueva y acertada forma de conservación en México.

En 1999, Torre, el maestro de la disección, fundó con otros una ONG llamada Comunidad y Biodiversidad (COBI) para resucitar la pesca de la langosta y otras especies comerciales. Su equipo comienza cada proceso analizando las necesidades de los pescadores del lugar antes que las del animal. Mucho antes de que nadie pronuncie la palabra «conservación», entablan diálogos acerca del porvenir de la población. Con este enfoque han conseguido involucrar a comunidades enteras en las labores básicas que requiere la gestión sostenible del mar. Desde que COBI comenzó a trabajar con pescadores de la península de Yucatán, han constatado un aumento del 250 por ciento de las langostas y de un 130 por ciento de otras especies comerciales. «Colaboramos estrechamente con CONAPESCA en aspectos básicos. Además de salvar a las dichosas especies, creamos confianza», explica.

Torre apenas puede disimular su frustración cuando piensa en la debacle de la vaquita. Denuncia que, a pesar del empeño de las mejores mentes de México y EE.UU., los científicos siguen esgrimiendo los mismos argumentos: sobre la aplicación de las normativas, sobre las redes de enmalle y sobre el río Colorado. El enroque en las posiciones propias y en las de sus agencias, en lugar de cooperar, ha tenido consecuencias funestas.

Waffles dirige hoy una entidad llamada Noroeste Sustentable que diseña desde cero estrategias de conservación en la región de La Paz, en Baja California, 900 kilómetros al sur de Santa Clara. Hace unos años, el grupo se dirigió a una comunidad costera que estaba pescando furtivamente en una reserva insular cercana y ofreció una alternativa a sus habitantes. En acuerdo con los pescadores, restauraron un estuario agonizante situado a pocos kilómetros de la mayor ciudad de la zona para hacer posible la cría de almejas. En lugar de subvencionarles por no pescar, la entidad les pagó por gestionar el recurso, hacer estudios biológicos, soltar las almejas y vigilar los bancos de cría frente a los furtivos. Hoy los pescadores gestionan una granja sostenible valorada en millones de dólares. Recogieron la primera cosecha de almejas este verano.

Mientras conduce por La Paz, Waffles se lamenta de que la misma transformación no pueda ayudar a la vaquita. Después, sentado en un restaurante con vistas al mar, afirma: «Creo de veras que la única solución para la vaquita radica en que los pescadores se comprometan a salvarla». Señala que ningún pueblo de la historia ha experimentado ningún cambio radical por complacer a un Gobierno o a un grupo de bienhechores llegados de fuera. Te guste o no su presencia en la zona, los pescadores son los únicos que pueden salvar a una especie así. Y en el norte del golfo están enzarzados en un círculo vicioso de acusaciones y conflicto. Pero las comunidades de pescadores de otros lugares sí estarán dispuestas a aceptar cambios radicales si con ello garantizan su porvenir y el de sus familias.

Una de las cinco vaquitas halladas muertas la pasada primavera había sido acuchillada repetidas veces, presuntamente por alguien que pretendía ocultarla a las autoridades o por pura saña. En cambio, costa abajo, en La Paz, Waffles me relata una charla que mantuvo recientemente con la hija de un furtivo reconvertido en criador de almejas:

«¿Cómo se gana la vida tu padre?», le preguntó.

A lo que ella respondió: «Mi padre es experto en restauración, acuicultor... y pescador». IyC

PARA SABER MÁS

Conservation of the vaquita *Phocoena sinus*. Lorenzo Rojas-Bracho et al. en *Mammal Review*, vol. 36, n.º 3, págs. 179-216, julio de 2006.

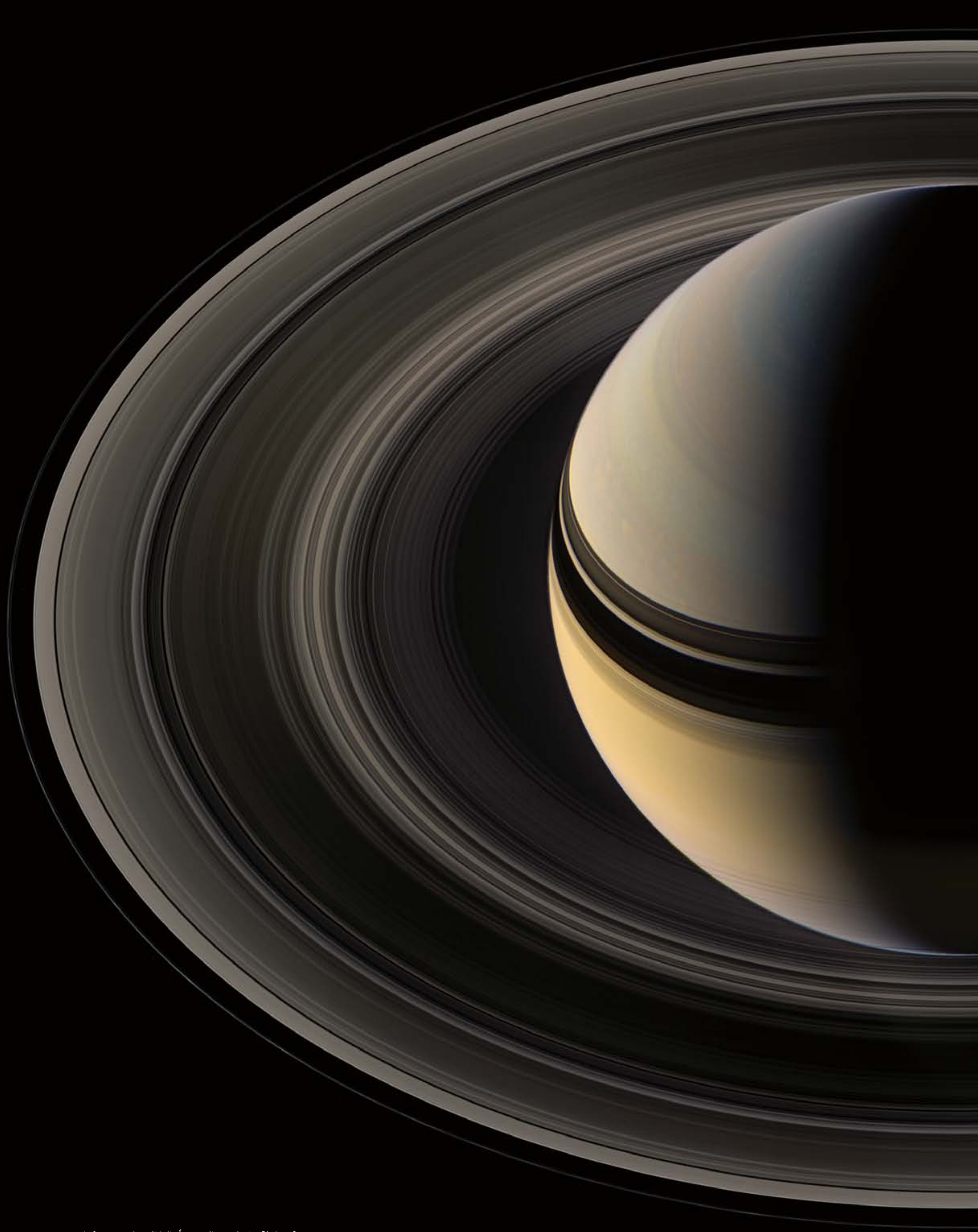
Emptying the world's aquarium. Erik Vance en *Harper's Magazine*, págs. 53-62, agosto de 2013.

Science, society, and flagship species: Social and political history as keys to conservation outcomes in the Gulf of California. Andrés M. Cisneros-Montemayor y Amanda Vincent en *Ecology and Society*, vol. 21, n.º 2, art. 9, junio de 2016.

Programa internacional de rescate de la vaquita: **www.vaquitacpr.org**

EN NUESTRO ARCHIVO

La totoaba, un pez enigmático del golfo de California. Francisco J. García de León en *IyC*, enero de 2013.





SISTEMA SOLAR

CASSINI EN SATURNO

Una histórica exploración del planeta anillado, sin precedentes en cuanto a magnitud y espectacularidad, ha llegado a su fin

Carolyn Porco

Carolyn Porco, planetóloga del Instituto de Ciencias del Espacio de Boulder, Colorado, fue la responsable del equipo de toma de imágenes de la misión Cassini. Es profesora visitante en la Universidad de California en Berkeley y pertenece al consejo de asesores de *Scientific American*.

Cuando Saturno esté alto en el cielo y la noche esté despejada, eche un vistazo con un telescopio de aficionado. Cuando haya disfrutado de su sobrecogedora belleza, busque en Internet las imágenes que la sonda *Cassini*, de la NASA, ha estado enviando a lo largo de los últimos 13 años. Es probable que se quede sin palabras: qué lejos hemos viajado, qué competentes hemos llegado a ser en la exploración interplanetaria, qué logro tan extraordinario ha sido conocer tan a fondo un mundo tan lejano como Saturno.

En el momento en que lea estas líneas, *Cassini* habrá terminado ya sus viajes alrededor de Saturno. El pasado 15 de septiembre se sumergió en la atmósfera del planeta y se convirtió en una bola de fuego que nadie vio. Esa destrucción deliberada ha servido para prevenir que la nave golpeara accidentalmente y contaminase alguna de las lunas de Saturno en las que, quizá, se dan condiciones adecuadas para la vida.

Como responsable del equipo de toma de imágenes de la misión, comencé a trabajar en el proyecto Cassini a finales de 1990, cuando todavía no era más que una idea. Viví todo el proceso de planificación y construcción, observé en persona el lanzamiento de la nave el 15 de octubre de 1997 desde Cabo Cañaveral, soporté su viaje de siete años a Saturno y ocupé un asiento de primera fila cuando llegó, en 2004. Entonces, *Cassini* empezó a revolucionar nuestra idea de Saturno y todo lo que hay a su alrededor.

Ninguna misión ha explorado nunca un planeta tan rico como Saturno tan a fondo y durante tanto tiempo. En su luna Titán encontramos mares de hidrocarburos y un ambiente superficial que rivaliza en complejidad con el de la Tierra. Observamos la meteorología de la atmósfera de Saturno y fuimos testigos del nacimiento, evolución y desaparición de enormes tormentas. Presenciamos nuevos fenómenos en los anillos que nos proporcionaron información sobre los procesos de formación de los sistemas solares, incluido el nuestro. Como los cartógrafos de antaño, trazamos mapas de las lunas de Saturno para futuros exploradores y descubrimos algunas nuevas, incluida toda una clase de pequeños cuerpos incrustados en los propios anillos. Y el que considero el mayor descubrimiento de *Cassini*: más de cien géiseres en el polo sur de la luna Encélado, que brotan de un océano subterráneo que podría albergar organismos extraterrestres. Durante trece años, mi vida se ha desarrollado allí, en los confines del sistema solar. Ahora, esa provechosa expedición científica ha llegado a su fin.

UNA VISTA DESDE CERCA

La necesidad de un examen exhaustivo de Saturno quedó clara a principios de los años ochenta, después de que las dos sondas *Voyager* realizaran aproximaciones al planeta. Aquel primer acto en la historia de la exploración de Saturno confirió dimensión y personalidad al planeta, pero dejó múltiples preguntas sin respuesta. Las *Voyager* descubrieron que Saturno era un planeta con un interior, una atmósfera y una magnetosfera complejos. En sus anillos, un vasto y reluciente disco de escombros helados, la misión halló signos de los mismos mecanismos físicos que resultaron clave en la configuración del sistema solar primitivo y en la de los discos de material en torno a otras estrellas. El paso de las sondas a través del sistema interior de Saturno puso al descubierto diversas lunas sometidas a interesantes fuerzas dinámicas. Titán, la más grande, cuya superficie permanecía oculta bajo una bruma espesa y ubicua, ofrecía, sin embargo, indicios de un posible océano de hidrocarburos líquidos. En conjunto, el sistema de Saturno parecía un destino ideal para llevar a cabo nuevas exploraciones.

Cassini fue un proyecto internacional, dirigido por la NASA y la ESA y diseñado para superar en todos los sentidos a la misión Voyager. Con un tamaño de unos siete metros por cuatro, la sonda era más grande que las *Voyager* y estaba equipada con los instrumentos científicos más complejos jamás transportados al sistema solar exterior. *Cassini* también llevaba consigo la sonda *Huygens*, un dispositivo equipado con seis instrumentos que, sin su cubierta protectora, medía 1,3 metros de diámetro y que fue diseñado para descender a la superficie de Titán.

Tras cruzar el sistema solar, *Cassini* se instaló en órbita alrededor de Saturno el 30 de junio de 2004. Su trayectoria en torno al planeta era a la vez complicada y precisa, y fue abriéndose como los pétalos de una flor a lo largo de su viaje de 13 años. Sus órbitas variaron en tamaño, inclinación y orientación para ver en primer plano todo el sistema interior de Saturno. También tuvimos el lujo de modificar las órbitas para echar otro vistazo a cosas que habíamos descubierto anteriormente.

La duración de la estancia de *Cassini* en Saturno también fue crucial para el éxito de la misión. Solo una observación prolongada permite captar procesos impredecibles, como los impactos de meteoroides en los anillos del planeta. Además, las

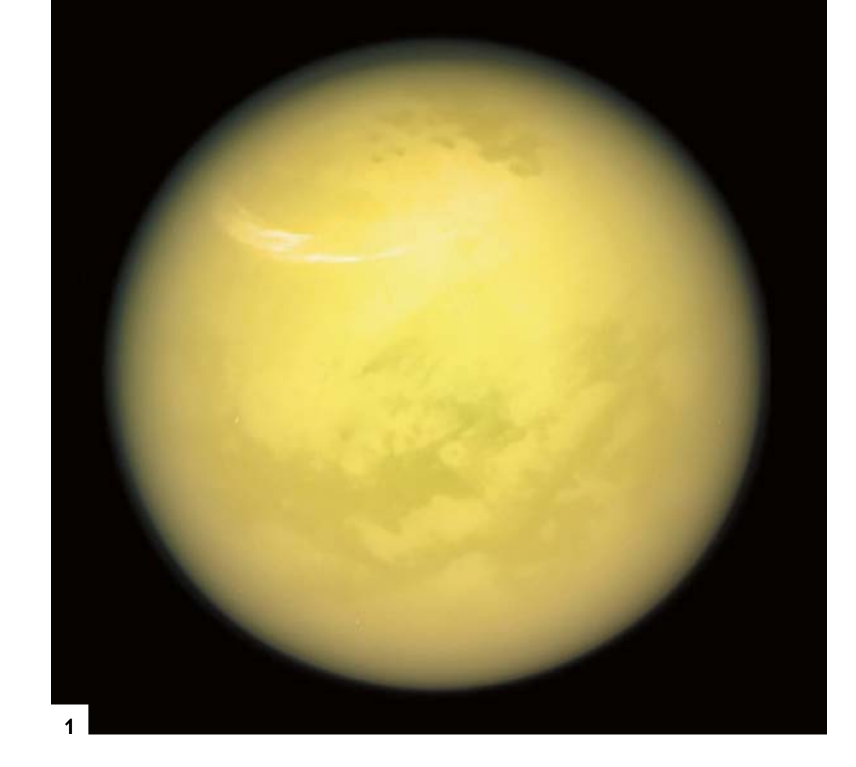
EN SÍNTESIS

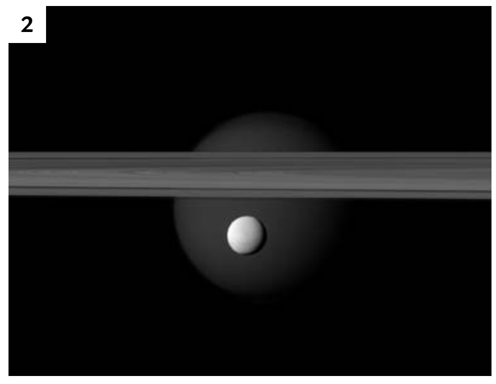
Tras pasar 13 años en la órbita de Saturno, la nave espacial *Cassini* concluyó su misión el pasado septiembre con una inmersión deliberada en la atmósfera del planeta.

A lo largo de su viaje, *Cassini* examinó la atmósfera, los anillos y las lunas de Saturno. En 2005, la sonda *Huygens* descendió a la superficie de Titán, una de las lunas del planeta.

La misión encontró lagos de metano líquido en Titán y un océano de agua líquida bajo la superficie de la luna Encélado, desde donde escapa por medio de géiseres. Se cree que este mar subterráneo podría albergar vida.

También descubrió olas montañosas de escombros y pequeñas lunas en los anillos de Saturno, así como un efecto que en invierno tiñe su atmósfera de azul.





TITÁN, la mayor luna de Saturno, brilla en esta imagen en colores falsos (*1*) y aparece a lo lejos (*2*) tras el satélite de menor tamaño Encélado y los anillos de Saturno.

CORTESÍA DE LA NASA, JPL-CALTECH Y EL INSTITUTO DE LA CIENCIA ESPACIAL

lentas y continuas migraciones orbitales de las lunas de Saturno, junto con los cambios atmosféricos producidos por las grandes variaciones estacionales en la iluminación solar, nos obligaron a realizar observaciones durante un tiempo lo más largo posible. Inicialmente estaba previsto que la misión durase cuatro años y finalizase el 30 de junio de 2008. Pero los sonados triunfos de la nave y la lógica indiscutible de mantener en funcionamiento un activo tan fecundo nos ayudaron a hacer presión para que se prolongase. Tuvimos éxito y se nos concedieron varias extensiones, lo que posibilitó, entre otros hitos, que fuéramos testigos de las excepcionales condiciones de iluminación durante el equinoccio de Saturno en agosto de 2009. Los rayos del sol que incidieron de forma casi rasante sobre los anillos revelaron la presencia de estructuras verticales que sobresalían y arrojaban sombras largas y fácilmente visibles.

Las operaciones orbitales de *Cassini* han terminado casi medio año saturniano (13 años y dos meses y medio terrestres) después de que comenzaran. Llegamos un poco después del punto culminante del verano austral del planeta, y la misión ha acabado en pleno verano de su hemisferio norte. Eso nos permitió realizar observaciones casi durante un ciclo estacional completo: vimos los hemisferios meridionales de Saturno y Titán pasar del verano al invierno, y los septentrionales pasar del invierno al verano. Fue un poco un truco cósmico, pero funcionó.

LAS LUNAS

Antes de la era espacial se pensaba que las lunas del sistema solar exterior serían anodinas bolas de hielo, muertas desde un punto de vista geológico. La misión Voyager demostró que esa suposición no era correcta. El objetivo de *Cassini* era examinar la horda de satélites de Saturno y permitirnos comprender sus historias. En algunos casos, resultaron ser extraordinarias.

Tomemos el caso de Jápeto. Su aspecto bicolor —con una cara blanca como la nieve y la otra de un negro intenso— constituía un misterio desde hacía mucho. Gracias a las imágenes de alta resolución de *Cassini* descubrimos que, incluso a pequeñas escalas, la luna estaba moteada con una mezcla de regiones claras y oscuras. Las cámaras y el instrumento térmico de la sonda nos mostraron el porqué. Tanto las variaciones de color hemisféricas como los parches locales se deben a un proceso térmico sin refrenar que se da solo en esta luna de rotación lenta. Las regiones que empiezan siendo oscuras se calientan lo suficiente para sublimar el hielo, tornándose aún más oscuras y calientes. Las que comienzan siendo blancas son más frías, y es en ellas donde se condensan esos vapores sublimados. Con el tiempo, todo el hielo de la región oscura desaparece y se acumula en las blancas. ¿Cómo pudo participar un hemisferio entero en este proceso? En su órbita alrededor de Saturno, Jápeto atraviesa a toda velocidad una nube de material oscuro y de grano fino procedente de Febe, uno de los satélites irregulares exteriores. Esta nube oscurece todo el hemisferio delantero de Jápeto, manteniéndolo más caliente y sin hielo. Misterio resuelto.

Otra luna destacada es Titán. Las cámaras de luz visible y de infrarrojo cercano de *Cassini*, así como su radar, lograron traspasar su bruma. Y, por supuesto, el descenso de dos horas y media que realizó la sonda *Huygens* a través de la atmósfera de Titán a principios de 2005 sirvió para captar imágenes panorámicas y para realizar mediciones de la composición, transparencia, vientos y temperatura atmosféricos antes de que la sonda se posara sobre la superficie. Lo que *Cassini* encontró en Titán fue un mundo de ciencia ficción, con un paisaje de aspecto familiar pero formado por sustancias insólitas.

Descubrimos que Titán tiene lagos y mares, pero no de agua, sino de metano líquido. En el polo sur, la cámara de alta resolución de *Cassini* avistó una de estas masas líquidas, con un tamaño cercano al del lago Ontario —y por ello bautizada como Ontario Lacus— en medio de una región de accidentes similares de menor tamaño. Otros instrumentos verificaron más tarde que el Ontario Lacus contenía, en efecto, metano líquido. Desde entonces hemos descubierto muchas masas de metano líquido de diferentes tamaños que, por alguna razón, se encuentran principalmente en latitudes septentrionales altas. Las observaciones de radar han revelado litorales escarpados y rocosos. En cambio, las llanuras ecuatoriales, donde aterrizó la sonda *Huygens*, son secas y están cubiertas de dunas que se prolongan durante largos trechos, interrumpidos de vez en cuando por terrenos más elevados.

Los lagos y mares de compuestos orgánicos líquidos que pueblan la superficie de Titán han suscitado especulaciones sobre si podrían contener vida. Pero la temperatura es allí extremadamente baja: –180 grados centígrados. En esas condiciones sería sorprendente encontrar reacciones químicas similares a las

UNA MISIÓN HISTÓRICA

Trece años en Saturno

La sonda *Cassini*, cuyo combustible se estaba agotando, se sumergió en la atmósfera de Saturno a mediados de septiembre, tras trece años en órbita. En el transcurso de su misión la nave permitió realizar descubrimientos sin precedentes sobre este complejo planeta, sus lunas y sus anillos. Encontró mundos en los que ríos de metano fluyen hacia enormes lagos; otros donde chorros de cristales de hielo brotan hacia el espacio procedentes de un océano subterráneo; y un entorno espacial en el que una sola tormenta puede envolver a un planeta gigante. A continuación ilustramos algunos de los hallazgos más destacados.

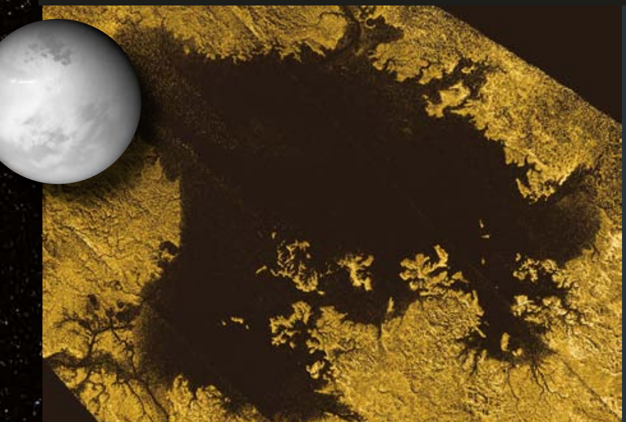
—Edward Bell

LUNAS



ENCÉLADO

En esta luna *Cassini* encontró imponentes géiseres en la región del polo sur, ilustrados aquí en una representación artística. Los datos indican que proceden de un océano subterráneo global de agua que contiene compuestos orgánicos y que, quizá, podría albergar vida.



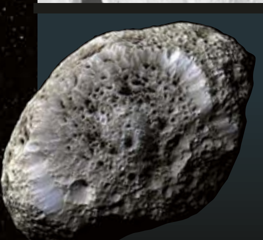
TITÁN

El mayor satélite de Saturno es el único lugar del sistema solar aparte de la Tierra que tiene líquido en su superficie de manera estable. Muchos de los procesos geológicos y atmosféricos de Titán son similares a los de nuestro planeta, con lluvias de metano que excavan ríos y forman lagos y mares de metano y etano líquidos. Esta imagen de radar en colores falsos muestra uno los lagos.



JÁPETO

Esta extraña luna era un misterio debido a su superficie con dos mitades diferenciadas, una negra y otra blanca. El polvo oscuro que hay en la órbita de Jápeto se posa sobre la cara delantera de la luna y un proceso térmico transfiere el hielo de la cara oscura a la clara. Esta imagen en primer plano revela que el mismo proceso térmico actúa también a escalas menores.



HIPERIÓN

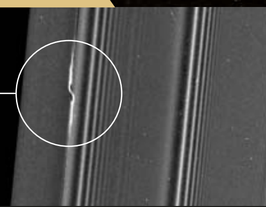
Cassini encontró que esta luna con forma de hamburguesa presenta poros como los de una esponja. Los científicos piensan que su densidad inusualmente baja hace que los impactos mellen la superficie en lugar de excavar en ella.

NAVE ESPACIAL

Desde que *Cassini* se instaló alrededor de Saturno el 30 de junio de 2004, sus 293 órbitas alrededor del planeta variaron en tamaño y orientación para darle una visión tanto cercana como panorámica de muchos lugares del sistema. La nave completó su misión principal de cuatro años en 2008 y emprendió a continuación la misión Equinoccio, que duró dos años, seguida por una segunda extensión de siete años, denominada Solsticio.

Órbitas de *Cassini*
- Misión inicial
- Misión Equinoccio
- Misión Solsticio

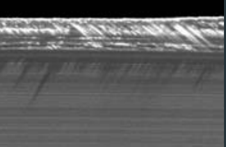
ANILLOS



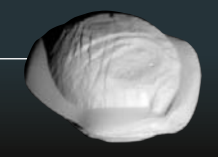
El examen minucioso de los anillos de Saturno ha revelado que estas configuraciones con forma de hélice se deben a perturbaciones gravitatorias causadas por una luna demasiado pequeña para despejar la zona.



La diminuta luna Dafne, vista aquí como un pequeño punto en la división de Keeler, provoca olas en los bordes de los anillos a medida que pasa a través de ellos.



Una pared montañosa formada por material anular se eleva verticalmente hasta una altura de 3,5 kilómetros sobre el anillo B y se extiende no menos de 20.000 kilómetros.



Pan, una luna de 28 kilómetros de diámetro en la división de Encke, adquirió su caricaturesca forma debido al material anular que cae sobre ella.

ATMÓSFERA

SUPERTORMENTA

En 2010 estalló en la atmósfera de Saturno una inmensa tormenta que comenzó a extenderse por todo el planeta (*1*). En cuestión de meses, creció hasta rodear la esfera y volver a encontrarse consigo misma. *Cassini* fotografió un detalle de las diversas capas de nubes de la tormenta (*2, colores falsos*).

1



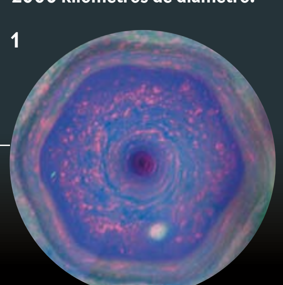
2



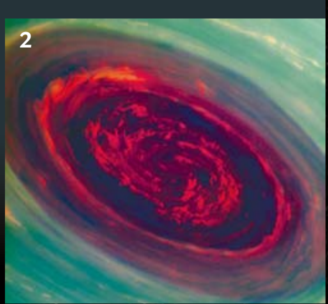
VÓRTICE POLAR

El remolino de nubes que hay en el polo norte de Saturno adopta una misteriosa forma hexagonal (*1*) con un furioso huracán en su centro (*2*). *Cassini* determinó que el ojo tiene unos asombrosos 2000 kilómetros de diámetro.

1



2



RON MILLER (*ilustración de la superficie de Encélado*); NASA, JPL-CALTECH, ASI Y CORNELL (*superficie de Titán*); CORTESÍA DE NASA, JPL-CALTECH Y INSTITUTO DE LA CIENCIA ESPACIAL (*las demás fotografías*); EDWARD BELL (*composición vertical de Saturno*)

que creemos necesarias para la bioquímica basada en el agua. Pero, si algún día detectásemos una bioquímica verdaderamente «alienígena» que se desarrollase en el metano, se trataría de un hallazgo histórico.

Para mí, sin embargo, donde *Cassini* ha hecho su mayor descubrimiento es sin duda en Encélado, una luna helada diez veces menor que Titán. Allí *Voyager* había descubierto vastas extensiones sorprendentemente lisas que hablaban de un pasado marcado por una intensa actividad interna y, tal vez, de una capa de agua líquida bajo la superficie helada; todo ello en un astro que parecía demasiado pequeño para tales fenómenos.

El primer indicio de actividad en Encélado llegó al poco de comenzar la misión, en enero de 2005, cuando descubrimos un penacho de partículas heladas que se desprendían del polo sur. Pusimos nuestras imágenes a disposición del público y quienes nos seguían en Internet vibraron de emoción. Muy poco después, otros instrumentos confirmaron que el penacho era real. Los operadores alteraron rápidamente las trayectorias para lograr una visión más cercana. Lo que descubrimos nos dejó estupefactos; pero, hasta 2008, cuando la NASA nos dio permiso para extender la misión, no pudimos dedicar el tiempo y los recursos necesarios para examinar este lugar fascinante.

Ahora sabemos que Encélado está siendo flexionada y tensada por las fuerzas de marea de Saturno. Ello genera un calor interno más que suficiente para crear un océano global de agua, con una profundidad que podría llegar a los 50 kilómetros en algunos lugares y enterrado bajo una capa de hielo de unos pocos kilómetros de espesor. Más de cien géiseres brotan de cuatro importantes fracturas en el polo sur, creando un penacho de vapor y partículas de hielo que se extiende a lo largo de cientos de kilómetros sobre la superficie. La mayor parte de la masa sólida de esta columna cae de nuevo, pero una pequeña parte se extiende aún más lejos, donde forma un anillo difuso pero de gran tamaño: el anillo E.

Cassini voló a través del penacho una docena de veces y analizó su material. Encontramos que en aquellas partículas —las cuales habían sido gotas del océano tan solo unas horas antes— había indicios de moléculas orgánicas de gran tamaño y otros compuestos que revelaban una actividad hidrotermal similar a la existente en el fondo marino de la Tierra. También sugerían que el océano tenía una salinidad equiparable a la de nuestro planeta. El vapor era principalmente agua, pero contenía trazas de compuestos orgánicos sencillos, además de dióxido de carbono y amoniaco, todos ellos importantes para el sustento e incluso el origen de la vida.

Los resultados de *Cassini* apuntan claramente a que bajo la superficie de Encélado podría haber actividad biológica. Ahora debemos enfrentarnos a preguntas que ponen la carne de gallina. ¿Fue este pequeño mundo helado el escenario de una segunda génesis de vida en el sistema solar? ¿Podría haber signos de vida en su penacho? ¿Podrían existir microorganismos en la «nieve» que cae sobre la superficie? No hay ningún otro cuerpo que posea de manera tan manifiesta todas las características que creemos necesarias para la habitabilidad. Hoy, constituye el lugar más prometedor y accesible del sistema solar para buscar vida. Y a algunos nos cautiva tanto esta posibilidad que estamos diseñando misiones para volver allí y averiguarlo.

LOS ANILLOS

Los anillos son los que hacen de Saturno un glorioso espectáculo. Comprender sus mecanismos era uno de los objetivos principales de *Cassini*. Son el resultado natural del colapso de una nube de escombros en rotación y, como tales, son lo más parecido al disco de material que pensamos que dio lugar al sistema solar. También constituyen un modelo para los discos protoestelares en torno a otras estrellas e incluso para los miles de millones de molinillos de polvo y gas que llamamos galaxias espirales. De todo lo que había que estudiar en Saturno, los anillos presentaban el mayor alcance científico.

Gracias a *Cassini* hemos llegado a comprender el origen de la mayor parte de su estructura. En ciertos lugares, la acción gravitatoria de alguna luna distante ha alterado las órbitas de las partículas del anillo, creando bordes bien definidos o perturbaciones ondulatorias que se propagan hacia fuera en espiral. En otros, allí donde hay lunas incrustadas, la gravedad ha agrupado las partículas en hermosas estructuras. Pan, una luna de unos 30 kilómetros de diámetro en la división de Encke, ha hecho esto con las partículas de sus inmediaciones. A su vez, el material anular que cae sobre ella ha cambiado la forma de esta luna hasta hacer que parezca que lleva un tutú.

En las regiones anulares donde las partículas son especialmente densas encontramos ondas autogeneradas, con longitudes de onda que van desde los cien metros hasta los cientos de kilómetros, las cuales se propagan a través del disco. Estas ondas pueden rebotar en discontinuidades abruptas de la concentración de partículas e interferir consigo mismas y unas con otras, lo que genera un aspecto caótico. Y también pudimos confirmar una predicción que hicimos en 1993 junto con Mark Marley, hoy en el Centro Ames de la NASA: que las oscilaciones acústicas en el cuerpo de Saturno pueden crear rasgos en los anillos. De esta manera, los anillos se comportan como un sismógrafo.

Con todo, las mayores sorpresas llegaron hacia el equinoccio de agosto de 2009. A lo largo del abrupto borde exterior del anillo mayor, el B, descubrimos una increíble cadena continua (con una longitud de 20.000 kilómetros) de sombras puntiagudas que delataba la presencia de «montañas»: olas de partículas que se elevan tres kilómetros por encima del plano anular. Estas formaciones podrían ser el resultado de la extrema compresión que sufre el material que pasa alrededor de las pequeñas lunas que han quedado atrapadas por la resonancia orbital en el borde



LOS ANILLOS DE SATURNO están formados por innumerables partículas heladas, algunas tan grandes como casas, y presentan divisiones debido al tirón gravitatorio de las lunas.

CORTESÍA DE LA NASA, JPL Y EL INSTITUTO DE LA CIENCIA ESPACIAL

del anillo. Dicho material sería lanzado verticalmente, como agua que se estrella contra un gran acantilado.

Vimos también un patrón espiral, muy apretado y sutil, que se prolongaba de manera ininterrumpida durante 19.000 kilómetros a través de los anillos internos C y D. El meticuloso trabajo de Matt Hedman, ahora en la Universidad de Idaho, y sus colaboradores reveló que, en 1983, el impacto de los restos de un cometa contra los anillos interiores forzó probablemente a todas las partículas que se encontraban allí a adoptar órbitas inclinadas. Tales órbitas experimentaban un movimiento de precesión, como el de una peonza, más rápido para las órbitas interiores que para las externas. Desde entonces, esa perturbación ha ido enrollándose cada vez más apretadamente hasta crear una ondulación espiral de tres metros de altura, una estructura que ni siquiera existía durante las aproximaciones de las sondas *Voyager*. Hemos comprendido que el sistema solar es una maravilla dinámica, y que los anillos de Saturno, con su sinfín de formas fluidas, ofrecen una lección práctica sobre la universalidad, adaptabilidad e infinita riqueza de la gravedad.

LA ATMÓSFERA

Cassini también descubrió algunas características inesperadas en la constitución y comportamiento de la atmósfera de Saturno. A partir de su estudio a una gran variedad de altitudes, reveló sus patrones globales de circulación, composición y estructura vertical. La atmósfera se divide en bandas anchas, como la de Júpiter, aunque menos evidentes desde el exterior debido a la gruesa capa de niebla que cubre el estrato superior de nubes de amoniaco. Cuando *Cassini* investigó la troposfera, por debajo de esa bruma, halló que el ancho de las bandas va alternando con la latitud. Las más estrechas son más oscuras y coinciden con rápidas corrientes en chorro; las más anchas tienden a ser más brillantes y están alineadas con corrientes más lentas y tal vez incluso estacionarias con respecto a la rotación general del planeta. En su conjunto, la atmósfera de Saturno parece bastante estática. Incluso la sorprendente corriente en chorro hexagonal que hay sobre el polo norte ha cambiado poco desde que la *Voyager* la avistase por primera vez. Estamos dándonos cuenta de que la estabilidad es un rasgo común de los sistemas atmosféricos de los planetas gigantes: sin una superficie sólida bajo el gas, no hay fricción que disipe los movimientos atmosféricos. Una vez comienzan, continúan.

Sin embargo, nos alegró descubrir que la atmósfera de Saturno no es totalmente insensible al paso de las estaciones. Por encima de las nubes, durante el invierno del hemisferio norte, el planeta estaba desarrollando un espectáculo inesperado cuando *Cassini* llegó allí por primera vez: ¡era azul! Debido a que las dos aproximaciones de la misión Voyager se produjeron cerca de un equinoccio (y, por tanto, no proporcionaron imágenes del invierno), esta coloración extrema fue toda una sorpresa. Lo que creemos más probable es que el menor flujo de radiación ultravioleta durante el invierno, junto con el bloqueo solar que las sombras de los anillos producían sobre ese hemisferio, reducían la producción de la niebla que cubre al planeta. En una atmósfera más despejada hay más probabilidades de que se produzca la dispersión de Rayleigh (el proceso que hace que la atmósfera terrestre sea azul) y de que el metano absorba la luz roja del Sol. La hermosa franja azul celeste que tiñe el hemisferio invernal de Saturno parece un recorte de la atmósfera de Neptuno adherido allí. ¿Quién lo habría imaginado?

Una característica distintiva de Saturno que conocemos desde hace un siglo es su propensión a que estallen colosales tormentas, en una escala de tiempo del orden de decenios. Así que nos hizo mucha ilusión darle la bienvenida a una de ellas a finales de 2010. Durante unos 270 días, observamos cómo este monstruo atronador y relampagueante nacía como una pequeña perturbación en el hemisferio norte, crecía y se extendía alrededor del planeta hasta que su cola se encontró con su cabeza y, finalmente, se desvaneció. Este es otro fenómeno que ninguna nave espacial había presenciado jamás. Sospechamos que el agua que constituye la capa de nubes más profunda de Saturno puede suprimir la convección en la atmósfera de hidrógeno, más ligera, durante unos decenios, hasta que finalmente se impone la fuerza ascensional y se produce una gran explosión convectiva.

EXPLORADORA DE MUNDOS

Desde sus comienzos en 1990 hasta su dramática conclusión el pasado mes de septiembre, *Cassini* ha escrito una parte tremendamente exitosa de la exploración más allá de nuestro planeta. Su histórica expedición nos ha mostrado intrincados detalles del funcionamiento de un hermoso sistema planetario que nos resulta notablemente extraño. Ha servido para mejorar nuestro conocimiento de las fuerzas que dieron su forma actual a Saturno y su entorno, a nuestro sistema solar y, por extensión, a otros sistemas estelares y planetarios.

No es probable que una misión con tanto potencial regrese pronto a Saturno. Haber formado parte de esta magnífica aventura ha significado vivir la exigente pero gratificante vida de una exploradora de nuestro tiempo, una rastreadora de mundos lejanos. Y aquí termino, agradecida de saber que la historia de *Cassini* seguirá inspirando a la humanidad durante mucho tiempo. IyC

PARA SABER MÁS

Saturn's curiously corrugated C ring. M. M. Hedman y otros en *Science*, vol. 332, págs. 708-711, 6 de mayo de 2011.
Enceladus's measured physical libration requires a global subsurface ocean. P. C. Thomas y otros en *Icarus*, vol. 264, págs. 37-47, 15 de enero de 2016.
Could it be snowing microbes on Enceladus? Assessing conditions in its plume and implications for future missions. Carolyn C. Porco y otros en *Astrobiology*. Publicado en línea el 11 de agosto de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cassini-Huygens en Saturno. Jonathan I. Lunine en IyC, septiembre de 2004.
Encélado. Carolyn Porco en *IyC*, marzo de 2009.
Superficie y atmósfera de Titán. Ralph Lorenz y Christophe Sotin en IyC, mayo de 2010.
Tormentas de metano en Titán. Ricardo Hueso en IyC, diciembre de 2010.
El océano caliente de Encélado. Frank Postberg y Thorsten Dambeck en IyC, diciembre de 2015.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



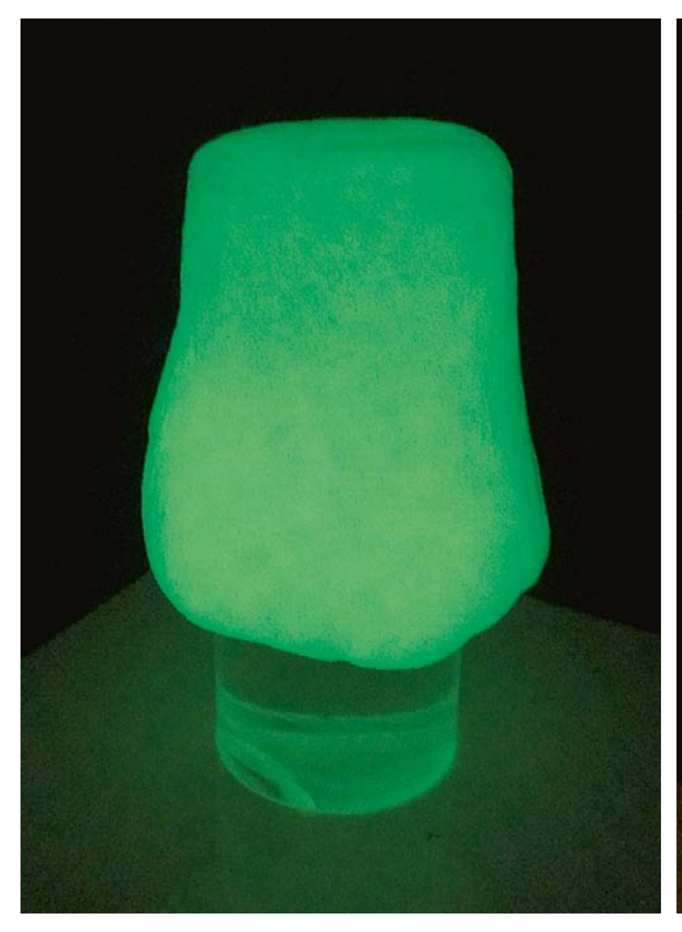
Slime, el fluido mágico que arrasa entre los jóvenes

Los líquidos no newtonianos se han puesto de moda. Aprovechamos esta oportunidad para adentrarnos en el mundo de la química de forma lúdica y experimental

Una pareja de amigos (arqueólogos, por más señas) habían venido a comer a casa. Su hija, de nueve años, me mostraba algo realmente sugestivo. Sus pequeñas y delicadas manos jugaban con un fluido muy viscoso, una masa casi plástica y elástica de un vivo color rojo. Todos la observábamos mientras ella estiraba sin piedad esa extraña sustancia, hasta que formaba largos hilos que goteaban lentamente. Luego, la amasó hasta formar una bola que hizo rebotar, para sorpresa de todos, sobre la mesa. «Alucinante —pensé—, un líquido que bota.»

Joana, así se llama la niña, me explicó que ella misma había fabricado semejante maravilla y que no era difícil, que sus amigas también lo hacían. Aquel día supe que algo que llevaba muchos años interesándome podía hacerse en casa. En el artículo que sigue intentaré compartir con los lectores lo que he descubierto gracias a Joana: una actividad química llena de diversión que permite una inmersión en el mundo de los fluidos no newtonianos.

Empecemos por el principio. Todos sabemos que los fluidos presentan, a diferencia de los sólidos, poca cohesión interna; de ahí que adopten la forma del recipiente que los contiene. Si son ga-





TODAS LAS FOTOGRAFÍAS SON DE MARC BOADA

1 EL *SLIME* LUMINISCENTE adopta una apariencia fantasmagórica cuando lo observamos a oscuras.

seosos, llenan todo el volumen del contenedor; si son líquidos, presentan una superficie libre. Tanto unos como otros son viscosos. Ello significa que, al moverse, las moléculas que los componen experimentan cierta fricción entre sí.

Grosso modo, podemos decir que, en los fluidos denominados newtonianos, esa viscosidad es proporcional a los esfuerzos mecánicos necesarios para hacer fluir el material y a un coeficiente propio de cada sustancia (el coeficiente de viscosidad dinámica). A esta categoría pertenecen los gases y algunos líquidos como el agua o la gasolina. Pero, curiosamente, hay sustancias en las que la viscosidad varía de forma no lineal (no es proporcional) con las solicitaciones mecánicas y los esfuerzos requeridos para hacer fluir el material. A estos fluidos se les llama, por oposición a los anteriores, no newtonianos. Ejemplifiquemos este comportamiento con un experimento de lo más sencillo.

Tomemos un par de cucharadas soperas de harina de maíz (maicena). Aportemos una cucharada de agua y mezclemos bien. Tan pronto la mixtura sea homogénea, comprobaremos que su comportamiento ha cambiado radicalmente. Al mezclar con la cuchara, detectamos que el material se resiste, y mucho.

Dejemos esa masa a su aire. En segundos, comenzará a fluir, adoptando la forma de una superficie libre lisa y brillante. Golpeémosla entonces con un pequeño martillo, o con el puño, o soltemos sobre ella una bola densa y pesada. En todos los casos, martillo, puño o bola rebotarán como si hubieran chocado contra algo rígido. Depositemos ahora la bola delicadamente sobre la mezcla de harina y agua. Lentamente y en pocos segundos, se hundirá.

Acabamos de comprobar que, ante potentes esfuerzos mecánicos, este material presenta tal viscosidad que parece sólido; en ausencia de estos, en cambio, se comporta como un líquido. Técnicamente, podemos decir que la viscosidad aparente se incrementa con el gradiente del esfuerzo cortante. A los materiales que exhiben este comportamiento se les llama líquidos dilatantes.

No resulta difícil encontrar fluidos con un comportamiento opuesto. En comercios especializados podremos comprar un aditivo para resinas y pinturas que les confiere propiedades singulares. Estos aditivos constituidos por geles de sílice presentan la peculiaridad de que dificultan el goteo pero facilitan la mezcla. Ello hace que, si agitamos la mixtura durante un tiempo, se transforme en un líquido; pero en reposo, recupere su condición de pasta.



2 FORMULACIÓN BÁSICA sin aditivos: cola blanca, bicarbonato y solución limpiadora de lentillas.

Este comportamiento conocido como tixotrópico, es muy próximo al que presentan la arena mojada de la playa, el mortero de cemento o un barro fluido. En estos materiales, la viscosidad también disminuye en función de esfuerzos mecánicos como las sacudidas. Es por ello por lo que, al construir estructuras arquitectónicas de hormigón, los operarios someten el material a fuertes vibraciones: con esta práctica consiguen que este se fluidifique, de forma que permita el escape del aire ocluido y rellene todos los rincones del forjado (el molde donde se endurece el hormigón). Otro ejemplo —que todos hemos experimentado— nos lo ofrece la playa. Coloquemos nuestros pies sobre la arena mojada, movámoslos rítmicamente y nos hundiremos poco a poco como si de arenas movedizas se tratara. Todos estos materiales se caracterizan por presentar una viscosidad que disminuye en función de los esfuerzos de deformación a los que se les somete; son los denominamos fluidos pseudoplásticos.

A este tipo de fluidos debemos el nombre popular que suele recibir la masa viscosa que tanto divertía a Joana: *slime*, que en inglés significa «limo», «baba» o «lodo». Veamos cómo podemos obtener nuestro propio *slime* casero para uso infantil.

La receta más simple consta de tres ingredientes: cola blanca de carpintero, bicarbonato sódico y una disolución de borato sódico (o bórax). Aclaremos en primer lugar que, pese a que la disolución de bórax no entraña un peligro especial, resulta más seguro utilizar en su lugar líquido para la limpieza de lentillas, pues lo contiene en bajas concentraciones.

Compraremos estos productos en cualquier supermercado, junto con algunos botes de plástico con tapa hermética. Con todo a punto, procederemos a la preparación del material.

Pongamos en el bote unos 50 centímetros cúbicos de cola blanca. Añadamos media cucharadita (de café) de bicarbonato sódico y mezclemos bien. Añadamos luego entre dos y tres centímetros cúbicos de líquido limpiador. Al poco de agitar, la masa se volverá mucho más viscosa. Continuemos con la mezcla hasta que el material quede homogéneo. Extraigámoslo del bote y amasemos a fondo con las manos. Al principio, es pegajoso; pero poco a poco deja de



3 CON UN COLORANTE DE USO ALIMENTARIO obtendremos un moco verde que nos recordará (a los más veteranos) al mítico Blandi Blub.

serlo ❷. Ha llegado el momento de empezar a jugar.

Pero antes, detengámonos a explicar qué ha sucedido. ¿Qué transformaciones químicas subyacen al fenómeno? Por un lado, la cola blanca es una disolución de un polímero, el acetato de polivinilo, derivado del alcohol polivinílico. Por otro, cuando se disuelve el bórax en agua, este se disocia y el ion borato queda libre, pudiendo unirse a las larguísimas cadenas del polímero vinílico. En realidad, el bórax forma enlaces entre las cadenas poliméricas; ello aumenta el tamaño de las mismas y, por tanto, la viscosidad de la mezcla. Finalmente, el bicarbonato tiene la función de mantener un *p*H alcalino (en medio ácido, los puentes creados por el borato se rompen, con lo que se pierde la plasticidad del material).

Ahora sí, ha llegado el momento de someter a nuestro «lodo» a todo tipo de pruebas. Para empezar, formemos un churro y estirémoslo. Al principio se resiste, ya que se encuentra en la zona de esfuerzos de deformación elástica. Pero, superado un determinado umbral, el material fluye con facilidad; tanto es así, que acaba formando finísimos hilos que pueden terminar en el suelo.

Amasemos de nuevo la extraña masa y dejémosla sobre una superficie brillante de cristal, plástico o metal. Esperemos. Transcurridas unas horas, se habrá estirado hasta formar una superficie lisa, plana y totalmente horizontal. Es decir, nuestro semisólido es, en realidad, un material autonivelante, como algunos morteros utilizados en la construcción.

Llevemos el *slime* todavía más al límite de sus posibilidades mecánicas. Trabajémoslo con las manos hasta conseguir un cilindro y tiremos súbitamente de sus extremos: se romperá, desgarrándose como un sólido gelatinoso. Luego, juntando los dos trozos, se soldarán de nuevo sin ninguna dificultad. Nuestro fluido «mágico» también es, por tanto, un material autosoldante, como el vidrio a alta temperatura y en estado pastoso, en el que dos trozos se unen sin solución de continuidad.

Formemos ahora una bola y dejémosla caer de cierta altura sobre nuestra superficie de pruebas. ¿Rebota? En caso afirmativo, verificamos que, al menos en parte, nuestro moco sintético se comporta como un sólido elástico. En realidad, lo de botar puede que lo haga o puede que no. Todo dependerá de la cantidad de disolución borada que hayamos incorporado, ya que el *slime* es muy sensible a pequeñas variaciones en las proporciones de los ingredientes.

Prosigamos nuestra indagación. Una primera línea de investigación pasa por ensayar otros tipos de adhesivos, con formulaciones ligeramente distintas. (Aquí debo agradecer la colaboración de Pegamentos Instant, que me ha proporcionado todo tipo de colas de uso escolar con las que he podido obtener *slimes* literalmente alucinantes).

Comencemos con el pegamento transparente. Este también polimeriza con cierta cantidad de bicarbonato sódico y un 5 por ciento de líquido limpiador de lentillas. Pero, a diferencia de la cola blanca —y sin que yo sepa por qué—, proporciona un *slime* más fluido. Además, siendo transparente, podemos tintarlo y convertirlo en una masa de vivo color rojo, azul o verde, algo que hará las delicias de los más pequeños. Cualquier pigmento soluble en agua nos servirá, pero los que mejor resultan son los colorantes alimentarios ❸. (Recordemos que esta actividad es ideal para realizarla con niños, por lo que debemos ser muy escrupulosos con la selección de los productos empleados.) Recomiendo también ensayar con pegamentos o colas que ya incluyen pigmentos fosforescentes: el resultado es un moco que reluce a oscuras, lo que permite todo tipo de juegos ❶.

Y no se acaban aquí las posibilidades experimentales. Adentrémonos en el mundo de los aditivos. ¿Queremos un *slime* más fluido todavía? Añadamos un cucharadita de jabón líquido para platos, a ser posible con el mismo color que el pigmento que queramos utilizar. El proceso es fácil. Solo debemos preocuparnos de añadirlos (jabón y pigmento) antes del bicarbonato y de la disolución de bórax —orden que deberemos respetar con todos los aditamentos que queramos ensayar—. Tras mezclarlo todo, amasarlo con las manos y estirarlo largamente tendremos algo más parecido a una baba que a cualquier otra cosa ❹.

En esta línea, podemos experimentar con numerosos productos domésticos: jabón líquido para ropa, suavizante para la misma, gel de baño... Todos ellos obrarán en diverso grado por dos causas. La primera: su *p*H. Los detergentes son alcalinos, por lo que protegen los enlaces químicos intracatenarios que forma el borato; los productos para la higiene corporal tienen un *p*H casi neutro.



❹ EL DETERGENTE PARA VAJILLAS confiere al *slime* mayor fluidez y un aspecto acaramelado.



❺ LA PURPURINA es uno de los aditamentos típicos. Proporciona un espectacular acabado metalizado.



❻ UN *SLIME* MAGNÉTICO fagocita a un imán de neodimio.

La segunda causa es que ambos aportan fluidez y plasticidad a la masa.

Quizás el producto doméstico que ofrece resultados más singulares sea el gel de afeitado. Al mezclarlo con cola transparente, pasa por una primera fase en la que se espuma. Tras algunos días de reposo, pierde gas, se encalma y presenta un bello aspecto nacarado. Si añadimos luego el bicarbonato y la solución limpiadora de lentillas, la masa resultante no solo se muestra plástica, bastante elástica y fluida, sino que, además, vibra como un trémulo corte de membrillo y, convenientemente esferificada entre las manos, bota descaradamente sobre una superficie sólida. Si tiramos rápidamente de ella, se desgarra con facilidad; pero si lo hacemos lentamente, fluye formando hilos o membranas que pueden llegar a ser delgadísimas.

Los efectos de los aditivos son tan notables y diversos que vale la pena adoptar los métodos propios de la investigación científica. He podido comprobar que pocos de los niños y niñas que experimentan con estos materiales toman notas sobre la composición de los mismos. Y es precisamente aquí donde debemos incidir. La obtención de estos maravillosos fluidos es una magnífica excusa para que nuestros jóvenes inauguren una libreta de laboratorio donde documentar las fórmulas y sus efectos sobre los materiales obtenidos. Constituye una excelente puerta de entrada a la investigación sistemática.

Retomemos la experimentación. Aprovechando la gran viscosidad de estos fluidos, podemos añadirles algunos materiales sólidos que permanecerán en suspensión. El primero y muy utilizado es la purpurina, que confiere unos espectaculares acabados metalizados ❺. Pero son mucho más interesantes las partículas de productos ferromagnéticos: hierro en forma de virutas bien finas, magnetita pulverizada o arena magnética (que encontraremos en algunas playas), por poner tres ejemplos.

Para conseguir virutas de hierro, lo más práctico es visitar algún taller mecánico y pedir permiso para pasar un imán bajo las amoladoras. El material obtenido se tamiza y se mezcla a partes iguales con la cola transparente; luego se añaden el bicarbonato y la solución de borax. El *slime* obtenido será atraído con fuerza por un imán, lo que nos permitirá asistir a un pequeño espectáculo magnético. Hagamos —aunque sea solo mentalmente— el experimento. Amasamos con las manos una bola, o una oblea muy gruesa de nuestro fluido mágico. La ponemos sobre la mesa y, sobre ella, un potente imán de neodimio. En un par de minutos y con un lento pero imparable movimiento, el «moco magnético» lo habrá engullido ❻.

El fenómeno es divertidísimo y puede mejorarse ajustando la granulometría y cantidad del material magnético, así como la viscosidad del *slime*. Para esto último no solo podemos emplear jabón líquido; también sirve el agua. El jabón deberemos añadirlo con cierta regularidad, ya que, aunque guardemos estos mocos artificiales en botes herméticos, siempre tienden a secarse y, con el tiempo, se espesan. El factor tiempo es importante también por otro motivo: las reacciones de polimerización no son instantáneas y se prolongan más allá de la fase de mezclado. Por eso no hay que intentar obtener la viscosidad adecuada inmediatamente; es mejor quedarse un poco corto de solución de bórax y darle unas horas al producto para que se estabilice.

Siguiendo estas recomendaciones, descubriremos un fascinante mundo de materiales sorprendentes y divertidos. Una fórmula perfecta para que nuestros jóvenes puedan adentrarse, casi sin darse cuenta, en el mundo de la química.

EN NUESTRO ARCHIVO

Experimentos, muy entretenidos, con Polyox, masilla casera y otros fluidos no newtonianos. Jearl Walker en *IyC*, enero de 1979.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Su labor docente y divulgadora ha sido reconocida por uno de los premios anuales de la Real Sociedad Española de Física y la Fundación BBVA 2017.



El árbol de Farey y sus frutos irracionales

Un ingenioso método gráfico que permite entender de otra manera la estructura de los números reales

La revista londinense de tirada anual *The Ladies' Diary: Or, Woman's Almanack* («El diario de las damas, o almanaque de la mujer») gozó de larga vida. Como podía leerse en su subtítulo, desde 1704 hasta 1841 se publicaron en sus páginas calendarios astronómicos, acertijos, problemas matemáticos y «muchos entretenimientos adaptados para el uso y diversión del sexo débil». En la edición de 1747 apareció la siguiente cuestión de índole matemática: «Se pide encontrar el número de fracciones de diferentes valores, cada una menor que la unidad, tal que sus denominadores sean menores que 100».

Si se hubiera tratado de identificar todas las posibles fracciones con denominadores menores que 100, habría bastado con sumar 1 + 2 + ··· + 98 + 99, que da 4950 fracciones. Sin embargo, el enunciado especificaba «de diferentes valores», y esa respuesta estaría repitiendo muchos, como 10/10 = 99/99, 1/10 = 2/20, etcétera. Dicho de otro modo, el problema pedía encontrar el número de fracciones irreducibles de denominador menor que 100. Decimos que una fracción p/q es irreducible cuando p y q no tienen divisores comunes más allá del 1; es decir, cuando p y q son coprimos, o primos relativos.

Las soluciones que proponían los lectores de *The Ladies' Diary* se publicaban en el número del año siguiente. Esta vez hubo que esperar cuatro. En 1751, alguien de nombre Fitcoin dio con la respuesta correcta: 3003 fracciones distintas.

Las fracciones de Farey

Acostumbrados a las fracciones desde la infancia, nos parecen objetos elementales. Pero no nos llevemos a engaño: se trata de una de las muchas formas en que podemos representar los números racionales, y de la relación entre tales representaciones se han extraído grandes gemas matemáticas.

El geólogo y ensayista inglés John Farey (1766-1826) escribió artículos sobre temas tan diversos como geología, música, monedas, ruedas de carro o cometas. En 1816 publicó un curioso resultado sobre fracciones en la revista *Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine*. Farey, que consideraba su hallazgo irrelevante, proponía ordenar de menor a mayor las fracciones irreducibles con denominador menor o igual que n pertenecientes al intervalo [0,1]. El resultado sería lo que hoy llamamos sucesión de Farey de orden n, denotada F_n. A continuación presentamos las cuatro primeras:

$$F_1 = \left\{\frac{0}{1}, \frac{1}{1}\right\},$$
$$F_2 = \left\{\frac{0}{1}, \frac{1}{2}, \frac{1}{1}\right\},$$
$$F_3 = \left\{\frac{0}{1}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{1}{1}\right\},$$
$$F_4 = \left\{\frac{0}{1}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \frac{1}{1}\right\}.$$

¿Detecta el lector el patrón de formación? ¿Sería capaz de generar la sucesión de Farey F_5 a partir de F_4? El resultado es

$$F_5 = \left\{\frac{0}{1}, \mathbf{\frac{1}{5}}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \mathbf{\frac{2}{5}}, \frac{1}{2}, \mathbf{\frac{3}{5}}, \frac{2}{3}, \frac{3}{4}, \mathbf{\frac{4}{5}}, \frac{1}{1}\right\}.$$

Farey observó que podía generar las fracciones que aquí aparecen en negrita (las nuevas, con denominador 5) a partir de las que componen F_4 sumando de una forma un tanto peculiar algunos pares consecutivos:

$$\frac{0}{1} \oplus \frac{1}{4} = \frac{0+1}{1+4} = \frac{1}{5},$$
$$\frac{1}{3} \oplus \frac{1}{2} = \frac{1+1}{3+2} = \frac{2}{5},$$

etcétera, y conjeturó que este procedimiento funcionaría siempre, lo que permitía encontrar la sucesión F_n a partir de F_{n-1}.

La demostración de la conjetura hubo de esperar al gran Augustin-Louis Cauchy (1789-1857), quien la publicó en su obra *Exercices de mathématique*, donde atribuyó erróneamente la primacía del resultado a Farey. Hoy sabemos que, en realidad, el matemático Charles Haros había publicado el resultado ya en 1802 en el *Journal de L'Ecole Royale Polytechnique*. Godfrey Harold Hardy, en su famosa *Apología de un matemático*, comenta al respecto: «Farey es inmortal por no haber entendido un teorema que Haros había demostrado a la perfección catorce años antes». Otro ejemplo más de la ley de Stigler para los epónimos: «Si el teorema A tiene el nombre de B, entonces probablemente el primero en enunciarlo o demostrarlo fue C» (como ocurre, por cierto, con la propia ley de Stigler).

Sea como fuere, pertrechados con estos conceptos, ahora podemos parafrasear el problema de *The Ladies' Diary* de la siguiente manera: ¿cuántos elementos tiene la sucesión de Farey F_{99}?

Caminos en el árbol de Farey

Existen muchas representaciones interesantes de los números racionales a partir de esta idea de Haros y Farey. Los círculos de Ford, por ejemplo, constituyen una preciosa y sorprendente versión geométrica de las sucesiones de Farey que les recomiendo investigar en Internet. Para nuestros propósitos, sin embargo, nos centraremos en la estructura conocida como «árbol de Farey» (*véase la figura de la página siguiente*).

Este árbol se construye partiendo de las fracciones 0/1 y 1/1, los extremos del

intervalo [0,1]. A partir de ellas, y utilizando la suma de Farey, se van obteniendo los siguientes niveles:

$$\frac{0}{1}\oplus\frac{1}{1}=\frac{1}{2},$$

a partir del cual obtenemos

$$\frac{0}{1}\oplus\frac{1}{2}=\frac{1}{3},$$
$$\frac{1}{2}\oplus\frac{1}{1}=\frac{2}{3},$$

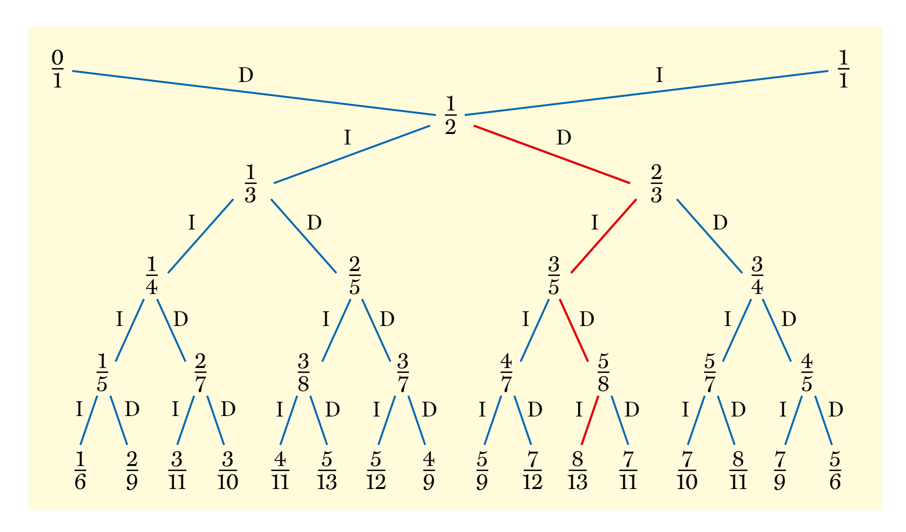
etcétera. Observemos que estamos frente a un árbol binario. Cada nodo p/q del árbol participa como progenitor de dos nuevas fracciones: sus descendientes izquierdo y derecho, indicados en la figura como *I* y *D*, respectivamente. Por ejemplo, los descendientes de la fracción 2/7 son

$$\frac{1}{4}\oplus\frac{2}{7}=\frac{3}{11},$$

el hijo izquierdo, y

$$\frac{2}{7}\oplus\frac{1}{3}=\frac{3}{10},$$

el derecho. (Nótese que la «suma de Farey» de dos fracciones cualesquiera es siempre mayor que la más pequeña y menor que la más grande.) No resulta difícil demostrar que en este árbol aparecen todos los números racionales del intervalo [0,1] sin repetición.



EL ÁRBOL DE LOS RACIONALES: Esta figura muestra los seis primeros niveles del árbol de Farey. En él, cada elemento se obtiene mediante la aplicación sucesiva de la «suma de Farey» entre fracciones, la cual se define como $p_1/q_1 \oplus p_2/q_2 = (p_1+p_2)/(q_1+q_2)$. Cada elemento tiene dos descendientes, etiquetados como *I* (el izquierdo) y *D* (el derecho). Puede demostrarse que el árbol de Farey incluye todos los números racionales del intervalo [0,1] sin repetición, cada uno de los cuales queda identificado por un único camino, o secuencia binaria de *I* y *D* (*en rojo, un ejemplo*). Los números irracionales pueden identificarse con secuencias infinitas en el árbol de Farey.

Observemos que partiendo de 1/2 en el árbol de Farey existe un camino único a cualquier fracción p/q. Por ejemplo, el camino a 8/13, señalado en rojo en la figura, comienza en 1/2, toma el camino derecho (*D*) para alcanzar 2/3, luego el izquierdo (*I*) para llegar a 3/5, de nuevo el derecho (*D*) hasta 5/8, y finalmente el izquierdo (*I*), hasta 8/13. De esta manera, el número 8/13 queda representado de manera unívoca por la secuencia binaria *DIDI*.

El método descrito permite asociar una secuencia binaria finita a cualquier número racional entre 0 y 1. Y, puesto que todos esos racionales aparecen una y solo una vez en el árbol de Farey, podemos deducir que el conjunto de los números racionales entre 0 y 1 es numerable, ya que el de secuencias binarias finitas también lo es.

Fracciones continuas

Veamos cómo se relaciona el árbol de Farey con otra de las representaciones clásicas de los números reales: las fracciones continuas, de las que ya hemos hablado en esta columna [*véase* «Radicales infinitamente jerarquizados», por Bartolo Luque; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2014]. Recordemos cómo se computa la fracción continua de un número racional con un ejemplo que se explica solo. La representación en fracción continua de 8/13 viene dada por

$$\frac{8}{13}=\frac{1}{\frac{13}{8}}=\frac{1}{\mathbf{1}+\frac{5}{8}}=\frac{1}{\mathbf{1}+\frac{1}{\frac{8}{5}}}=\frac{1}{\mathbf{1}+\frac{1}{\mathbf{1}+\frac{3}{5}}}$$
$$=\frac{1}{\mathbf{1}+\frac{1}{\mathbf{1}+\frac{1}{\mathbf{1}+\frac{2}{3}}}}=\frac{1}{\mathbf{1}+\frac{1}{\mathbf{1}+\frac{1}{\mathbf{1}+\frac{1}{\mathbf{1}+\frac{1}{\mathbf{2}}}}}}=[1,1,1,1,2],$$

donde los números entre corchetes indican cómo se lleva a cabo la expansión en fracción continua. En general, para un número $x = p/q$, tendremos

$$x=\frac{p}{q}=\frac{1}{a_1+\frac{1}{a_2+\frac{1}{a_3+\cdots}}}=[a_1,a_2,\cdots,a_n].$$

Esto nos proporciona una secuencia finita de números enteros positivos, a_k, llamados índices, los cuales representan nuestro número x.

Una de las maravillosas propiedades del árbol de Farey es que nos permite encontrar de manera muy sencilla la fracción continua correspondiente a un número p/q a partir de su camino asociado. Sin entrar en detalles, es tan fácil como contar los sucesivos grupos de *I* y *D* en dicho camino, los cuales se traducen en los índices de la fracción continua.

Los frutos irracionales

¿Podemos encontrar números irracionales en el árbol de Farey? Sí, pero solo «al final de sus ramas»; es decir, en el infinito. Las fracciones continuas de los números irracionales poseen un número infinito de índices, como por ejemplo ocurre con el número π:

$$\pi = [3; 7, 15, 1, 292, 1, 1, 1, 2, \ldots]$$

(el índice 3 separado por un punto y coma señala que se trata de la parte entera del número). Por regla general, las expansiones en fracciones continuas de los números irracionales no muestran ningún tipo de pauta, salvo en algunos casos de gran interés que aparecen en fenómenos físicos como la ruta cuasiperiódica al caos o los osciladores acoplados, que fue donde personalmente tropecé por primera vez con el árbol de Farey.

Veamos el caso de los números conocidos como «metálicos». La familia de ecuaciones cuadráticas

$$x^2 - bx - 1 = 0$$

con b = 1, 2, 3... tiene como soluciones positivas los irracionales cuadráticos

$$x = \left(b + \sqrt{b^2 + 4}\right)/2 .$$

Podemos reescribir estas soluciones a partir de su ecuación y expresarlas como fracciones continuas:

$$x = b + \frac{1}{x} = b + \cfrac{1}{b + \cfrac{1}{x}} = \cfrac{1}{b + \cfrac{1}{b + \cfrac{1}{x}}} = \cdots$$

$$= [b; b, b, b, ...] = [b; \bar{b}] ,$$

donde el primer índice, b, representa la parte entera del número irracional, mientras que $\bar{b}$ simboliza la repetición infinita de b. Para b = 1 nos encontramos con el primero de los números metálicos, el célebre número áureo:

$$\varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = [1; \bar{1}] .$$

Para nuestro propósito —que el número pertenezca al intervalo [0,1]—, nos desprenderemos de la parte entera:

$$\varphi - 1 = \frac{1}{\varphi} = \frac{\sqrt{5} - 1}{2} = [\bar{1}] .$$

Es decir, el inverso del número áureo expresado como fracción continua consiste en una sucesión infinita de índices de valor 1. Ahora recordemos que podíamos traducir fracciones continuas a caminos en el árbol de Farey. En este caso, la equivalencia viene dada por una tira infinita de (DI):

$$\frac{1}{\varphi} = [\bar{1}] = DIDIDI\ ... = (DI)^{\infty} .$$

De modo que los irracionales se encuentran «al final» de los caminos infinitos en el árbol de Farey: son los frutos que cuelgan de sus ramas.

Si truncamos una fracción continua de un número x en sus sucesivos índices, obtendremos fracciones que se conocen como convergentes, las cuales proporcionan aproximaciones cada vez más cercanas al número en cuestión. Si volvemos a x = 8/13 = [1, 1, 1, 1, 2], tendríamos como sucesivos convergentes [1] = 1/1, [1, 1] = 1/2, [1, 1, 1] = 2/3 y [1, 1, 1, 1] = 5/8.

Los convergentes cumplen una extraordinaria propiedad: cada convergente p_k/q_k proporciona la mejor aproximación al número x, sea racional o no, con denominador menor o igual que q_k. Una propiedad, por cierto, que ha sido ampliamente empleada por relojeros y mecánicos en la construcción de trenes de engranajes.

Si calculamos los sucesivos convergentes del inverso del número áureo, obtenemos

$$\frac{1}{1}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{3}{5}, \frac{5}{8}, \frac{8}{13}, \frac{13}{21}, \ldots$$

¿Le resultan ahora familiares los numeradores y los denominadores? ¡Se trata de los famosos números de Fibonacci! Recordemos que los números de Fibonacci, F_n (casualmente, se emplea la misma notación que para las sucesiones de Farey), se definen a partir de la iteración

$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2} ,$$

con F_0 = 1 y F_1 = 1. Y las fracciones que hemos listado arriba no son más que los cocientes de los sucesivos números de Fibonacci, F_{n-1}/F_n, cuyo límite cuando n tiende a infinito es, efectivamente, el inverso del número áureo.

Suele decirse que el número áureo es el más irracional de los irracionales. El motivo tiene que ver justamente con la velocidad a la que sus convergentes se aproximan a él. Puesto que los convergentes proporcionan la mejor aproximación a un irracional mediante fracciones, en el caso del número de oro, para el que todos sus índices son 1, esa convergencia es la que se produce más lentamente. Podemos proceder del mismo modo con el resto de los números metálicos: con b = 2 obtenemos el número de plata; con b = 3, el de bronce, etcétera.

En general, podremos hacer lo mismo con los irracionales que muestran periodicidad a partir de algún punto en sus infinitos índices. Para la mayor parte de los irracionales, sin embargo, sus expansiones tendrán índices carentes de pauta alguna. De modo que, si lanzamos a un caminante aleatorio por nuestro árbol, acabará en el fin de los tiempos en un número irracional, lo que nos proporciona un interesante método para estudiarlos desde un punto de vista probabilístico.

Vuelta al problema de *The Ladies' Diary*

Me gustaría acabar con el problema con que abríamos la columna: ¿cuántos elementos tiene la sucesión de Farey F_{99}? Vimos que F_n contenía todas las fracciones de F_{n-1} más todas las posibles fracciones irreducibles de denominador n. Esta última cantidad viene dada por la famosa función $\varphi(n)$ de Euler, la cual nos devuelve el número de enteros hasta n que son coprimos con n. Es decir, justo el número de posibles valores del numerador que hacen que las fracciones con denominador n sean irreducibles. Así que podemos expresar el número de fracciones en F_n, al que denotaremos $|F_n|$, como

$$|F_n| = |F_{n-1}| + \varphi(n) = 1 + \sum_{m=1}^{n} \varphi(n) .$$

En particular, $|F_{99}|$ = 3003.

Espero haberles convencido de que las inofensivas fracciones tienen más enjundia de la que aparentan. Si aún no lo ven así, y ya para acabar, a ver qué les parece el siguiente resultado.

Podemos etiquetar las fracciones ordenadas de la sucesión de Farey F_n como $a_{k,n}$, donde k = 1, ..., $|F_n|$. Así, por ejemplo, para F_5 tenemos 11 valores: $a_{1,5}$ = 0/1, $a_{2,5}$ = 1/5, ... $a_{10,5}$ = 4/5, $a_{11,5}$ = 1/1. Definamos ahora el número

$$d_{k,n} = a_{k,n} - \frac{k}{|F_n|} ,$$

el cual determina la diferencia entre la fracción de Farey k-ésima y el elemento k-ésimo del conjunto de $|F_n|$ puntos equidistribuidos en [0,1]. Sorprendentemente, en 1928 el matemático alemán Edmund Landau (1877-1938) presentó la siguiente igualdad:

$$\sum_{k=1}^{|F_n|} |d_{k,n}| = O\left(n^{\frac{1}{2}+\varepsilon}\right) ,$$

que viene a decir que la suma del valor absoluto de las distancias $d_{k,n}$ crece más despacio que la función $n^{1/2+\varepsilon}$, donde $\varepsilon > 0$.

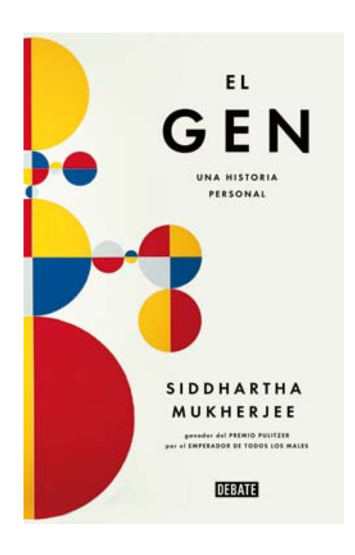
Landau nunca llegó a demostrar esta igualdad, ya que su veracidad resulta... ¡equivalente a la veracidad de la hipótesis de Riemann! Ahora, querido lector, si ha llegado hasta aquí, ya sabe qué propiedad de las fracciones tiene que demostrar para ganar un millón de dólares y la fama eterna. IyC

PARA SABER MÁS

Recreations in the theory of numbers. Albert H. Beiler. Dover, 2.ª edición, 1964.

The book of numbers. John H. Conway y Richard Guy. Springer Verlag, 1996.

Concrete mathematics: A foundation for computer science. Ronald L. Graham, Donald E. Knuth y Oren Patashnik. Addison-Wesley, 2.ª edición, 1994.



EL GEN
UNA HISTORIA PERSONAL
Siddhartha Mukherjee
Debate, 2017

Biografía conceptual del gen

Historia de la unidad que ha revolucionado la biología

Tres ideas revolucionaron la ciencia del siglo XX: átomo, bit y gen. Cada uno de esos conceptos inició su andadura como una noción abstracta, pero se desarrollaron, se adueñaron del pensamiento humano y transformaron la cultura, la sociedad, la política, la filosofía y el lenguaje. En cada caso se representaba la unidad irreducible —el bloque de construcción, la entidad básica de organización— de un todo mayor: el átomo, de la materia; el bit, de la información digitalizada; y el gen, de la herencia y la información biológica. En cuanto unidad fundamental, no podemos comprender la biología celular ni el organismo (en su estado normal o patológico, en su conducta e identidad) sin afianzarnos primero en el conocimiento del gen. Hay solo una molécula portadora de la información hereditaria y un código.

Nuestro conocimiento de los genes ha alcanzado tal nivel de refinamiento y profundidad que hemos pasado de estudiarlos en el tubo de ensayo a hacerlo en su contexto celular propio. Residen en los cromosomas, estructuras largas y filamentosas confinadas en el interior de la célula que contienen decenas de miles de genes concatenados unos con otros. Los humanos poseemos 46 cromosomas, 23 procedentes de un progenitor y 23 del otro. El conjunto entero de instrucciones genéticas portadas por un organismo se denomina genoma. El genoma viene a ser la enciclopedia de todos los genes, con notas a pie de página, anotaciones, instrucciones y referencias. El genoma humano contiene entre 21.000 y 23.000 genes, los cuales aportan las instrucciones para construir, reparar y mantener nuestro organismo.

Mukherjee dispone el libro cronológica y temáticamente. Al final recapitula su exposición en un manifiesto de 13 puntos, los cuales reconocen al gen como unidad básica de información hereditaria; la universalidad del código genético; la interacción entre genes, medio y azar; la variabilidad como premisa evolutiva; la importancia del contexto en la apreciación de la relación entre naturaleza y cultura; la inevitabilidad de las mutaciones; el origen génico de muchas patologías o la exposición de genes y genomas a manipulaciones químicas y biológicas.

La genética ha dejado su sello en numerosos campos de la biología. Abarca también el dominio de la ciencia de la información y la psiquiatría. Ha intervenido en las corrientes más oscuras del siglo XX. Solemos mencionar la eugenesia nazi en busca del superhombre con la eliminación de los enfermos mentales y los individuos y pueblos que ellos consideraban degenerados. Pero el movimiento eugenésico comenzó mucho antes en Inglaterra y en Estados Unidos. Francis Galton, primo de Darwin, defendió la mejora de la sociedad a través de una reproducción selectiva. No sabía en qué podría consistir un gen, pero sostuvo que el inteligente, el fuerte y el hermoso deberían reproducirse más que los peor dotados. En los años treinta, los programas estadounidenses y británicos de esterilización inspiraron la *Rassenhygiene* nazi. En esa pendiente peligrosa vuelven a caer quienes culpan de la criminalidad a malos genes o declaran la superioridad intelectual de blancos y asiáticos.

Una cadena de descubrimientos subsiguientes a la Segunda Guerra Mundial transformó de raíz los pilares de la biología. Se identificó el ADN como fuente de información genética y se desentrañó el mecanismo de acción génica en la síntesis de proteínas, responsable de la forma y la función. James Watson, Francis Crick, Maurice Wilkins y Rosalind Franklin resolvieron la estructura tridimensional del ADN. Se descifró el código genético de tres letras. En 1972, Paul Berg informó de la posibilidad de combinar dos moléculas de ADN para crear ADN recombinante. Se planteó entonces la posibilidad de que un gen erróneo se introdujera en un organismo equivocado: el experimento podría desencadenar una catástrofe biológica o ecológica. Pero no solo preocupaban los patógenos. Se puso sobre la mesa la perspectiva de una ingeniería genética humana: nuevos genes introducidos de forma permanente en el genoma de nuestra especie [*véase* «Modificar nuestra herencia», por Stephen S. Hall; Investigación y Ciencia, noviembre de 2016].

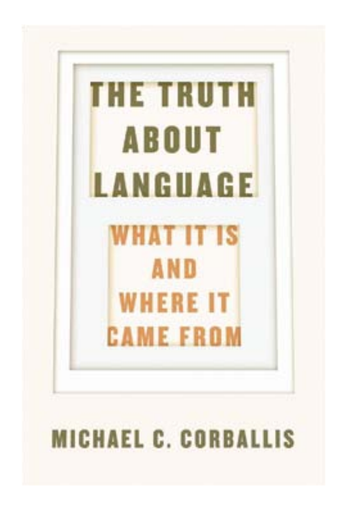
En 1974 se recurrió al virus SV40 genéticamente modificado para infectar embriones de ratón. Las células infectadas se mezclaron con células normales para crear una quimera embriológica. Los embriones quiméricos fueron implantados en ratones. Todos los órganos y células emanaron de esos embriones: sangre, cerebro, aparato digestivo, corazón, músculos y, sobre todo, espermatozoides y óvulos. Si las células embrionarias infectadas por virus formaran algunos espermatozoides y óvulos de los ratones recién nacidos, entonces los genes víricos se transmitirían de un ratón a otro a través de generaciones, igual que cualquier otro gen. A la manera de caballos de Troya, los virus podrían transmitir permanentemente genes en el genoma del animal y producir los primeros organismos genéticamente modificados. (Hoy sabemos que las células poseen detectores, adquiridos hace tiempo en la evolución, que reconocen los genes víricos y los marcan con un sello químico, a modo de signos de cancelación, para evitar su activación.) La secuenciación y clonación génicas significaban la lectura y escritura de los genes. Y se abrió una puerta de esperanza para la terapia génica, que, no obstante, sufrió un estancamiento en los decenios siguientes, hasta que vuelve a renacer de la mano de las células madre [*véase* «Terapia génica, segunda parte», por Ricki Lewis; Investigación y Ciencia, mayo de 2014].

Merced a los avances técnicos, podemos ya descifrar el modo en que los genes operan en el tiempo y en el espacio para ejecutar funciones complejas. Podemos

alterarlos deliberadamente para cambiar su función. Esa transición —de la explicación a la manipulación— es lo que hace que el campo de la genética resuene más allá del confín de la ciencia. Al doblar el nuevo siglo, Philippe Horvath y Rodolphe Barrangou descubrieron que algunas bacterias habían desarrollado un arpón que se hincaba en los genomas de los virus invasores y los paralizaba. El sistema —un conmutador— reconocía los virus lesivos por su secuencia de ADN. Esos cortes no se producían al azar, sino en determinados sitios específicos del ADN. No tardó en descubrirse que el sistema bacteriano de defensa entrañaba dos componentes críticos. El primero era el rastreador, un ARN codificado en un genoma bacteriano que encajaba con el ADN del virus y lo reconocía. El segundo era el ejecutor. Una vez el ADN vírico había sido reconocido como extraño, entraba en acción una proteína bacteriana, la Cas9, para asestar un corte letal al gen vírico. Había comenzado la era de la edición génica, que hoy lo invade todo.

Como no hay libro que no presente algo aprovechable, tampoco lo hay que no pueda mejorarse en algo. Esta biografía conceptual del gen ha olvidado el papel determinante desempeñado en la edición génica por el español Francisco Juan Martínez Mojica [*véase* «El descubrimiento del sistema CRISPR-Cas», por Francisco J. M. Mojica y Cristóbal Almendros; Investigación y Ciencia, octubre de 2017].

—Luis Alonso



THE TRUTH ABOUT LANGUAGE
WHAT IT IS AND WHERE IT CAME FROM
Michael C. Corballis
University of Chicago Press, 2017

Señala, gruñe y habla

La gestualidad como origen del lenguaje humano

«Todo el mundo es capaz de hablar trol. No hay más que señalar y gruñir.» La afirmación de Fred Weasley en *Harry Potter y el cáliz de fuego,* de J. K. Rowling, podría servir para describir los orígenes del lenguaje humano si el psicólogo Michael Corballis está en lo cierto en su obra *The truth about language* («La verdad sobre el lenguaje»). Durante años, Corballis ha sido uno de los principales defensores de la idea de que el lenguaje tiene su origen en los gestos. Su último libro desarrolla este argumento desde los primates gesticuladores hasta la neurociencia moderna.

Por lo general, el lenguaje se considera la joya de la corona de la superioridad humana sobre los demás animales. Parece surgir casi de la nada en nuestro pasado evolutivo y carece de parangón con cualquier otro modo de comunicación animal. Algunos animales manifiestan sus estados de ánimo por medio de chasquidos, zumbidos, ladridos, gorjeos o balidos. También pueden expresar ira, impaciencia, autoridad, sumisión, deseo o apego a través de gestos, pero nada de eso les sirve para transmitir una frase tan sencilla como «di una patada al balón».

Por su carácter único y su potencial, el lenguaje humano supone una llamada de atención para los darwinistas, provocándonos para que averigüemos cómo y de dónde surgió [*véase* «Lenguaje, redes y evolución», por Ricard Solé, Bernat Corominas Murtra y Jordi Fortuny; Investigación y Ciencia, mayo de 2013]. Corballis otorga un papel fundamental a las neuronas espejo, las cuales parecen evocar las acciones que observamos (en un mono, por ejemplo, las neuronas espejo se disparan cuando el animal agarra un objeto y también cuando ve a un congénere llevar a cabo la misma acción). Corballis señala que se produce un solapamiento entre partes del sistema de neuronas espejo y dos regiones de la corteza cerebral izquierda que, en los seres humanos, se hallan asociadas a la producción y comprensión del lenguaje: la zona de Broca y la de Wernicke.

Las neuronas espejo cuentan con sus detractores [*véase* «Debate en torno a las neuronas espejo», por Christian Wolf; Mente y Cerebro n.º 65, 2014], pero para Corballis plantean la posibilidad de que el lenguaje «evolucionara dentro de un sistema que, en los tiempos en los que éramos monos, estaba especializado en agarrar cosas». En los seres humanos, las neuronas espejo parecen tomar parte también en otras acciones. Una de ellas es señalar. Por fortuna para Corballis, señalar es uno de los primeros hitos de la comunicación en los niños («mira esto», «dame eso, por favor»), el cual surge alrededor del primer año de vida y significa el comienzo de la atención compartida. También se altera en algunos trastornos sociales, como el autismo. Asimismo, el control preciso de los músculos faciales a la hora de hablar parece compartir circuitos corticales con las regiones que controlan los gestos.

Con todo, ¿qué tiene de errónea la idea de que el lenguaje surgió de la capacidad de nuestros antepasados homínidos para vocalizar? Fue la explicación favorita de Charles Darwin, desarrollada en *El origen del hombre* (1871). Pensaba que la capacidad para el aprendizaje vocal complejo se remontaba muy atrás en la evolución, por lo menos hasta nuestro antepasado común con los pájaros. Corballis responde que, a diferencia de los gestos, las vocalizaciones de los primates no parecen controlarse de forma voluntaria; aparecen como los tics nerviosos, más estrechamente vinculados con la expresión de emociones que con el intercambio deliberado de información. Los cercopitecos verdes (*Chlorocebus pygerythrus*) son conocidos por tener tres llamadas de socorro diferenciadas: para águilas depredadoras, leopardos y serpientes. Pero una llamada de socorro no implica intercambio lingüístico, gestual ni de ningún otro tipo.

Cabe sospechar que muchos —como el primatólogo y etólogo Frans de Waal,

autor de *La política de los chimpancés* (Alianza editorial, 1993)— considerarán rudimentaria la tesis de Corballis sobre las vocalizaciones de los primates. Sin embargo, primatólogos como Jane Goodall y David Premack comparten sus puntos de vista. Se equivoque o no, lo cierto es que Corballis se expresa con una atención al detalle propia de un académico y con una prosa ingeniosa y exenta de autobombo. La combinación de estilo y argumento convierte *The truth about language* en la mejor obra hasta la fecha sobre la teoría gestual del lenguaje.

Pero ¿qué significa que el lenguaje, el intercambio de información entre emisores y receptores, surgiera de los gestos? Gesticular puede indicar una teoría de la mente (la capacidad de entender lo que otros pueden saber o estar pensando) y, sin duda, constituye un requisito para el lenguaje. Los seres humanos dan por sentado este entendimiento mutuo, pero su existencia no se ha conseguido demostrar de manera concluyente en otros animales. Algunos perros responden cuando se les señala algo, pero han sido entrenados para ello, y tampoco señalan cosas a otros canes. Los chimpancés pueden señalar, pero rara vez lo hacen; al menos, no tanto como se esperaría en la comunicación social rutinaria. Estos y otros primates son capaces de seguir la mirada de los demás, pero mirar no es un acto de comunicación deliberado. De hecho, seguir la mirada de otro es, en potencia, un tipo de hurto.

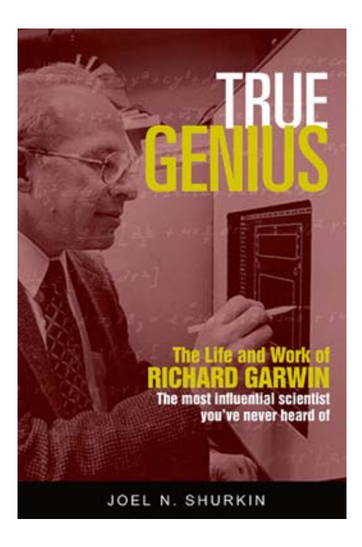
Se acepta que el origen de nuestra capacidad gestual se pierde en la larga línea de los homininos fósiles durante la trayectoria evolutiva de entre seis y siete millones de años que nos separa de nuestro antepasado común con los chimpancés. No obstante, en ese período sucedió todo. Los seres humanos empleamos el lenguaje para fomentar el aprendizaje, la cooperación y el intercambio de bienes y servicios; un gran salto comparado con el acto ocasional de señalar. La sociabilidad es característica de nuestra especie tanto como lo es el lenguaje, y resulta difícil imaginar que nuestros sistemas sociales funcionaran sin él.

Del mismo modo, podría argumentarse que el lenguaje humano surgió para explotar las capacidades psicológicas que posibilitan nuestra avanzada sociabilidad. En este caso, con toda seguridad Corballis defendería que la gesticulación representa la trayectoria evolutiva más probable hacia esas facultades. Pero sobre esta cuestión el autor se pronuncia relativamente poco. Lo que sí sabemos es que, sin esas habilidades, quizá seguiríamos señalando y gruñendo como los troles.

—Mark Pagel
Escuela de Ciencias Biológicas
Universidad de Reading

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 543, págs. 620-621, 30 de marzo de 2017. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de nature



TRUE GENIUS
THE LIFE AND WORK OF RICHARD GARWIN, THE MOST INFLUENTIAL SCIENTIST YOU'VE NEVER HEARD OF
Joel N. Shurkin
Prometheus Books, 2017

Richard Garwin

Genio de la física nuclear y de la política global

A mediados de noviembre de 2016, Richard Garwin, de 88 años, recibió la Medalla Presidencial de la Libertad, el máximo reconocimiento civil que se concede en Estados Unidos. El galardón premia a los ciudadanos que hayan realizado una contribución sumamente meritoria para la seguridad y los intereses nacionales, la paz mundial, la cultura o cualquier otro empeño público o privado. Proyectista clave de la bomba de hidrógeno, dueño de patentes decisivas en el desarrollo de la técnica de nuestro tiempo, Garwin fue un experto indiscutido en defensa y en desarme. Sin embargo, su figura es muy poco conocida.

Joel Shurkin ha escrito una biografía ágil y que refleja no solo los episodios relevantes de la vida de Garwin, sino también el estado de la física en unos años especialmente dorados. De origen judío, su abuelo paterno procedía de Riga y emigró a Chicago, donde en 1808 nació Robert, el padre de Richard. El abuelo abrió una tienda de zapatos. Cuando Robert tenía siete años, su padre fue asesinado por el socio y su madre marchó con los hijos a Cleveland, donde había una comunidad hebrea pujante con un orfanato propio. En 1921 Robert se graduó en ingeniería. Se dedicó a la enseñanza de electricidad en la Escuela Técnica Superior y a la proyección de cine durante la noche.

Richard nació el 19 de abril de 1928. Desde niño, su padre le introdujo en el mundo de la técnica, enseñándole a desarmar y volver a armar mecanismos e ingenios. Muy habilidoso, ayudaba a su padre a reparar el proyector y a construir amplificadores de audio para las películas. En sus años universitarios, Richard trabajaría también de proyectista. Precoz en ciencias, a los doce años pidió un libro de cálculo. En el garaje doméstico crearon un taller y laboratorio donde ejercitarse en pruebas de química, soplado de vidrio y circuitos eléctricos.

Decidido a estudiar física, no dudó en doctorarse en Chicago, centro de la física puntera con la figura de Enrico Fermi como foco de atracción. Logró el título de doctor en 1949, con 21 años. Su mentor fue el propio Fermi, quien se trasladó de Italia en 1938 tras ganar el Nobel de física y trabajó en Nuevo México ayudando a construir la primera bomba atómica. Fermi afirmó que Garwin fue el único genio genuino con el que se había encontrado en su vida, de ahí el título del libro. A Fermi se le llamaba «el Papa», por su origen italiano y por suponerlo infalible en física.

Un portento de la naturaleza, según unos, nunca leía enteros los artículos; le bastaba con mirar los resúmenes. Fermi había sido el descubridor de la fuerza débil, una de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza. Adoptando las teorías de Wolfgang Pauli, Fermi, trabajando en Roma con neutrones de 1934 a 1938, demostró que podían crearse artificialmente isótopos radiactivos mediante el bombardeo de un elemento con número suficiente de neutrones. Observó también que, cuanto más lentos avanzaban los neutrones hacia el núcleo, más eficaces resultaban, y que la velocidad de absorción era diferente para cada elemento. Iba a resultar de particular importancia lo que aconteciera cuando lo aplicaran al uranio.

Al solicitarle que fuera su director de tesis, Garwin le explicó a Fermi que contaba con una dilatada experiencia en tubos de vacío y que tenía habilidad para el dibujo y la ingeniería de máquinas. Fermi aceptó. Para su propia tesis doctoral ideó varios contadores. Investigó las propiedades de núcleos radiactivos de sodio y creó un mecanismo para medir el ángulo de emisión de rayos gamma siguiendo la desintegración de una sustancia radiactiva. Terminada la tesis, en solo dos años, y pese a la política de la universidad de no contratar a sus propios graduados, se le ofreció allí un puesto. Fermi le pidió que le ayudara en un nuevo modelo del núcleo atómico.

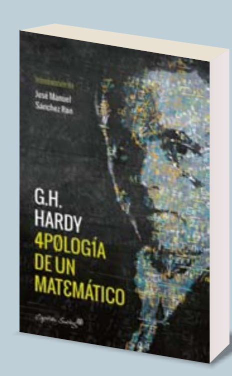
La Universidad de Chicago mantenía estrechas relaciones con el Laboratorio Nacional de Los Álamos, en Nuevo México. Fermi, que acudía los veranos, le invitó en el de 1950 para que trabajara en armas nucleares. En 1951 Garwin ayudó a la creación de la primera bomba de hidrógeno, mil veces más potente que sus predecesoras atómicas. La explosión se hizo de acuerdo con las indicaciones de Garwin, revelaría más tarde Edward Teller, el padre del proyecto (Teller, veinte años mayor que Garwin y nacido en Hungría, ha pasado al imaginario popular más por sus cruzadas políticas que por sus logros en física). De acuerdo con las indicaciones recibidas, el proyecto debía ser tan conservador como fuera posible para demostrar su viabilidad. Trabajó también en el diseño de satélites espía. Con la bomba de hidrógeno, el mundo comenzó a vivir en el borde del precipicio. Por eso se dedicó a combatir las posibilidades de uso.

En 1952 entró en el departamento de investigación de IBM, tarea que compaginaría con la de asesor en Los Álamos y Washington, así como con un compromiso con la Universidad de Columbia. La relación con IBM se prolongó a lo largo de cuatro decenios, hasta su retiro en 1993. Allí trabajó sobre resonancia magnética; fue el catalizador del algoritmo Cooley-Tukey FFT, de importancia clave en el procesamiento digital de señales, y desempeñó un papel crucial en el desarrollo de las impresoras láser y en monitores de pantalla táctil.

Garwin perteneció al Comité Científico Asesor del presidente de los Estados Unidos de 1962 a 1965 y de 1969 a 1972, bajo los mandatos de Kennedy, Johnson y Nixon. De 1993 a 2001 estuvo al frente del equipo asesor sobre control y no proliferación de armas nucleares del Departamento de Defensa [*véase* «Brechas en la defensa antimisil», por Richard Garwin; Investigación y Ciencia, enero de 2005]. Intervino en el tratado de prohibición de armas nucleares y presidió el comité asesor sobre su control. Casi todo el arsenal nuclear de los Estados Unidos lo integran tipos diversos, en tamaño y forma, de bombas de hidrógeno, desde las pequeñas que pudieran acabar con una compañía de fusileros hasta armas con potencial genocida.

—Luis Alonso

NOVEDADES



APOLOGÍA DE UN MATEMÁTICO
Godfrey Harold Hardy
Capitán Swing, 2017
ISBN: 978-84-947407-9-4
160 págs. (16 €)



LA IZQUIERDA FENG-SHUI
CUANDO LA CIENCIA Y LA RAZÓN DEJARON DE SER PROGRES
Mauricio-José Schwarz
Ariel, 2017
ISBN: 978-84-344-2585-9
400 págs. (19,90 €)

DE LAS BACTERIAS A BACH
LA EVOLUCIÓN DE LA MENTE
Daniel C. Dennett
Pasado & Presente, 2017
ISBN: 9788494733321
431 págs. (35 €)



LAS MATEMÁTICAS VIGILAN TU SALUD
MODELOS SOBRE EPIDEMIAS Y VACUNAS
Clara Grima y Enrique Fernández Borja
Next Door Publishers, 2017
ISBN: 978-84-946669-6-4
188 págs. (17 €)



Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Diciembre 1967

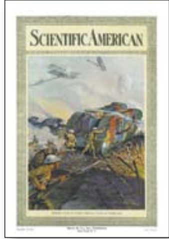
Estrellas de rayos X

«En los cinco años desde el descubrimiento de Scorpius X-1, los cohetes de exploración han detectado unas treinta estrellas de rayos X o, al menos, fuentes de radiación X. Se ha observado también en el espacio un fondo general, difuso, de rayos X. Para estas misiones se ha lanzado alrededor de una docena de cohetes y el tiempo total de observación asciende solo a una hora (cada vuelo proporciona cinco minutos). Los medios técnicos y la instrumentación que ya están a la vista nos permitirán pronto estudiar las estrellas de rayos X con mucho más detalle. Para empezar, los instrumentos se montarán en satélites y no en cohetes de vida corta. —Ricardo Giacconi.»

Giacconi compartió el premio Nobel de física de 2002.

Bacterias resistentes

«Hasta hace poco, se admitía que la aparición de bacterias resistentes a los medicamentos era consecuencia de un proceso predecible: la mutación espontánea de una bacteria que le confiere resistencia a un fármaco, y la multiplicación selectiva de la cepa resistente en presencia del fármaco. Hoy se estaría produciendo un fenómeno más ominoso conocido como resistencia a los fármacos contagiosa. Se trata de un proceso por el cual los determinantes genéticos de la resistencia a varios medicamentos se transfieren juntos y de una vez de una cepa resistente a otra cepa previamente sensible a los fármacos o propensa a sus efectos, sea de la misma especie bacteriana o de otra. Desde que se descubrió en Japón, en 1959, se ha detectado en numerosos países.»



Diciembre 1917

Cinta para películas

«Una mota de polvo, una leve variación en una solución química, un agua poco pura, una insignificante fluctuación de la tensión eléctrica en las lámparas de impresión, una mínima subida o bajada de la temperatura, una inapreciable contracción de la cinta; todos esos factores pueden suponer la diferencia entre una imagen que se ve clara, nítida y estable en la pantalla y una película granulosa, borrosa e inestable, inapta para su uso. Ello significa que, una vez que la cinta abandona la cámara, el trabajo de los actores, el director y el operador queda por completo en manos del personal del laboratorio. Nuestra imagen en color muestra las cintas de celuloide tras su envío a la sala de secado. En esta son enrolladas sobre unos grandes tambores metálicos o de madera que se hacen girar a bastante velocidad.»



Diciembre 1867

Tsunami caribeño

«"Estimado señor: Con profundo pesar debo comunicarle que el vapor estadounidense *Monogahela*, bajo mi mando, se halla actualmente varado en la playa de la ciudad de Frederiksted, en la isla de Santa Cruz, a la que fue arrojado por el más espantoso sismo jamás visto en el lugar. La primera señal que tuvimos de él fue un violento temblor de la nave, semejante al resoplido del vapor. Este duró unos treinta segundos e, inmediatamente después, se observó que el agua se retiraba rápidamente desde la playa. Cuando el mar regresó, en forma de un muro de ocho o nueve metros de alto, nos llevó por encima de los tinglados hasta la primera calle de la ciudad. Al retroceder, aquella ola devolvió el barco hasta la playa y lo depositó casi perpendicular al borde de un arrecife de coral. Milagrosamente, solo perdimos a cuatro hombres."

—S. B. Bissell, comodoro jefe»

El U.S.S. Monogahela*, un vapor balandra de 2078 toneladas propulsado por hélice, fue reflotado a los seis meses.*

Tranvías climatizados

«Al desplazarse uno al centro en tranvía en estas gélidas mañanas, lo desagradable de sentir los pies helados nos recuerda el plan adoptado en Francia para mantener calientes los pies de los viajeros. Ello se consigue insertando un tubo de hierro aplanado a lo largo del piso del vehículo. Cuando este sale de la cochera, el tubo se llena de agua caliente procedente de un caldero que a tal fin se mantiene a elevada temperatura. Esa agua conserva el calor, por lo general, durante unas dos horas. Nos agradaría ver el mismo plan introducido aquí [en EE.UU.]. Pero no cabe esperar que nuestras compañías de tranvías hagan nada por el confort de sus pasajeros, cuando sin molestarse por ello cosechan buenos beneficios. Muy posiblemente la idea de cargar una cantidad de agua caliente en sus vehículos para que los viajeros vayan de pie encima la percibirían como una broma divertida. Sus infelices y maltrechos caballos, con esparaván, no soportarían más carga.»



1917: Una cinta cinematográfica, muy probablemente para películas en blanco y negro, pasa por el tambor de secado durante el revelado.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXVII, N.º 23, 8 DE DICIEMBRE DE 1917

NEUROCIENCIA

Cómo construir un medidor de la consciencia

Christof Koch

La aplicación de pulsos magnéticos al cerebro mientras se mide su actividad eléctrica está resultando ser un modo fiable de detectar la consciencia.





SOSTENIBILIDAD

Aprovechar las inundaciones para combatir la sequía

Erica Gies

Una nueva estrategia propone recargar los acuíferos con el agua de las crecidas y bombearlos cuando escasean las lluvias.

SALUD

La verdad oculta sobre la pérdida de peso

Susan B. Roberts y Sai Krupa Das

Dos décadas de investigación revelan que lo que marca la diferencia a la hora de adelgazar es la composición de la dieta, más que la cantidad de calorías ingeridas.

FÍSICA DE PARTÍCULAS

Medir la belleza

Guy Wilkinson

El experimento LHCb del CERN ha obtenido posibles indicios de nuevas partículas. El hallazgo podría apuntar a una teoría más completa de las interacciones fundamentales.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes y Réquiem por la vaquita*; Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Javier Grande: *Mundos vecinos y Cassini en Saturno*; José Manuel González Mañas: *Una estrategia personalizada contra el cáncer*; Tomás Ortín: *El fin de la mediocridad copernicana*; Sara Arganda: *Genética de la esclerosis lateral amiotrófica*; Miguel A. Vázquez Mozo: *El enigma de los neutrinos*; Fabio Teixidó: *Estado de la ciencia global 2017*; Marián Beltrán: *Señala, gruñe y habla*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España